

petites centrales hydrauliques

petites

petites centrales hydrauliques petites centrales hydrauliques

petites centrales hydrauliques

Générateurs et installations électriques



**Petites centrales hydrauliques
Générateurs et installations électriques
De l'électricité grâce aux petites centrales
hydrauliques – une énergie propre qui
préserve l'environnement !**

Il existe en Suisse un potentiel important dans le domaine des petites centrales hydrauliques qui pourrait s'avérer financièrement intéressant pour de nombreuses communes, collectivités et industries.

Ce mode de production a malheureusement été négligé ces dernières décennies, la priorité ayant été donnée aux grandes centrales au fil de l'eau ou à accumulation dans les Alpes.

Par le Programme d'action énergies renouvelables (PACER) de l'Office fédéral des questions conjoncturelles, la Confédération a décidé d'intervenir pour inciter les propriétaires de droits d'eau, communes, administrations cantonales, ingénieurs, industriels et entrepreneurs à s'intéresser à cette forme de production d'énergie et à réaliser des installations. L'objectif est la promotion des technologies éprouvées des petites centrales hydrauliques (PCH) par une information objective et complète sur le sujet ainsi que la formation d'ingénieurs et de techniciens.

La brochure «Générateurs et installations électriques» fait partie d'un ensemble de quatre publications techniques concernant la conception et la réalisation de petites centrales hydrauliques :

- « Turbines hydrauliques »
- « Générateurs et installations électriques »
- « Régulation et sécurité d'exploitation »
- « Le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une miniturbine »

Conçue comme document et en même temps comme outil pratique, elle est destinée à aider les ingénieurs et techniciens non spécialisés qui sont concernés, dans le cadre de leur activité professionnelle, par la conception et la réalisation d'une petite centrale hydraulique.

Les générateurs et les installations électriques des petites centrales hydrauliques sont présentés du point de vue technique, le texte étant illustré par de nombreuses figures et accompagné d'exercices.

La brochure contient les informations suivantes :

- présentation du système PTDU (production – transport – distribution – utilisation) ;
- principes fondamentaux de l'électricité ;
- description et fonctionnement des générateurs synchrones et asynchrones ;
- exploitation des générateurs en parallèle sur un réseau interconnecté et en réseau isolé. Surveillance et contrôle ;
- critères de comparaison entre les générateurs synchrones et asynchrones pour un choix optimal ;
- établissement d'un cahier des charges d'un générateur ;
- protection et sécurité des installations.

Petites centrales hydrauliques

**Générateurs
et installations électriques**

Conception, rédaction et réalisation de l'édition française

Chapitres 1 à 5

- J. Dos Ghali, ingénieur EPFL, 1015 Lausanne
- J.-P. Ludwig, ingénieur EPFL, 1015 Lausanne

Chapitre 6

- J.-M. Chapallaz, ingénieur EPFL/SIA, 1450 Ste-Croix

Chapitre 7

- Ed. Schopfer, ingénieur ETS, Inspection fédérale des installations à courant fort, 1000 Lausanne

Relecture technique du manuscrit

- F. Heer, ingénieur EPFL, 1450 Ste-Croix
- D. Richardet, ingénieur civil EPFL-SIA, 1400 Yverdon

Correcteur

- J.-C. Scheder, 1038 Bercher

Graphisme de la couverture

- Isabelle Schaaf Graphic Design, 1020 Renens

Mise en pages, photocomposition et flashage

- DAC, 1006 Lausanne et
- CITY COMP SA, 1110 Morges

Direction du projet et coordination

- J. Graf, ingénieur ETS, Fontanezier

Associations de soutien

Les organisations suivantes recommandent et soutiennent la participation aux journées PACER « Petites centrales hydrauliques ».

ACS	Association des communes suisses
ADER	Association pour le développement des énergies renouvelables
ADUR	Association des usiniers romands
ARPEA	Association romande pour la protection des eaux et de l'air
ASE/ETG	Société pour les techniques de l'énergie de l'ASE
ASPEE	Association suisse des professionnels de l'épuration des eaux
INFOENERGIE	Centre de conseils
OFEL	Office d'électricité de la Suisse romande
PROMES	Association des professionnels romands de l'énergie solaire
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SMSR	Société des meuniers de la Suisse romande
SSIGE	Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux
UCS	Union des centrales suisses d'électricité
UTS	Union technique suisse
UVS	Union des villes suisses

ISBN 3-905232-55-3

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, août 1995.

Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la source.

Diffusion: Coordination romande du programme d'action «Construction et Energies» EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (N° de commande 724.247.2 f).

Form. 724.247.2 f 08.95 1000

Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le Programme d'action « Construction et Energie » se compose des trois programmes d'impulsions suivants :

PI BAT – Entretien et rénovation des constructions

RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité

PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Ils doivent favoriser une croissance économique qualitative et, par là, conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Jusqu'ici, si l'on fait abstraction du potentiel hydroélectrique, la contribution des énergies renouvelables à notre bilan énergétique est négligeable. Aussi le programme PACER a-t-il été mis sur pied afin de remédier à cette situation. Dans ce but le programme cherche :

- à favoriser les applications dont le rapport prix/performance est le plus intéressant ;
- à apporter les connaissances nécessaires aux ingénieurs, aux architectes et aux installateurs ;
- à proposer une approche économique nouvelle qui prenne en compte les coûts externes ;
- à informer les autorités, ainsi que les maîtres de l'ouvrage.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Le programme PACER se consacre, en priorité, à la formation continue et à l'information. Le transfert de connaissances est basé sur les besoins de la pratique. Il s'appuie essentiellement sur des publications, des cours et d'autres manifestations. Les ingénieurs, architectes, installateurs, ainsi que les représentants de certaines branches spécialisées, en constituent le public cible. La diffusion plus large d'informations plus générales est également un élément important du programme. Elle vise les maîtres de l'ouvrage, les architectes, les ingénieurs et les autorités.

Le bulletin « Construction et Energie », qui paraît trois fois par an, fournit tous les détails sur ces activités. Ce bulletin peut être obtenu gratuitement sur simple demande. Chaque participant à un cours ou

autre manifestation du programme reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie » EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés ; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont également les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités. Pour la préparation de ces activités une direction de programme a été mise en place ; elle se compose du Dr Jean-Bernard Gay, du Dr Charles Filleux, de M. Jean Graf, du Dr Arthur Wellinger ainsi que de Mme Irène Wuillemin et de M. Eric Mosimann de l'OFQC. La préparation des différentes activités se fait au travers de groupes de travail, ceux-ci sont responsables du contenu de même que du maintien des délais et des budgets.

Documentation

La brochure « Générateurs et installations électriques » fait partie d'un ensemble de quatre publications techniques concernant les petites centrales hydrauliques :

- « Turbines hydrauliques »
- « Générateurs et installations électriques »
- « Régulation et sécurité d'exploitation »
- « Le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une miniturbine »

Conçue comme document et en même temps comme outil pratique, elle est destinée à aider les ingénieurs et techniciens non spécialisés qui sont concernés, dans le cadre de leur activité professionnelle, par la conception et la réalisation d'une petite centrale hydraulique.

Les générateurs et les installations électriques des petites centrales hydrauliques sont présentées du

point de vue technique, le texte étant illustré par de nombreuses figures et accompagné d'exercices.

La brochure contient les informations suivantes :

- présentation du système PTDU (production-transport- distribution- utilisation);
- principes fondamentaux de l'électricité;
- description et fonctionnement des générateurs synchrones et asynchrones;
- exploitation des générateurs en parallèle sur un réseau interconnecté et en réseau isolé. Surveillance et contrôle;
- critères de comparaison entre les générateurs synchrones et asynchrones pour un choix optimal;
- établissement d'un cahier des charges d'un générateur;
- protection et sécurité des installations.

Le présent document a fait l'objet d'une procédure de consultation, il a également été soumis à l'appréciation des participants au premier cours pilote. Ceci a permis aux auteurs d'effectuer les modifications nécessaires, ceux-ci étant toutefois libres de décider des corrections qu'ils souhaitaient apporter à leur texte. Dans ce sens ils assurent l'entière responsabilité de leurs textes. Des améliorations sont encore possibles et des suggestions éventuelles peuvent être adressées soit au directeur du cours, soit directement auprès de l'Office fédéral des questions conjoncturelles.

Pour terminer nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de la présente publication.

Office fédéral des questions conjoncturelles
Service de la technologie
Dr B. Hotz-Hart
Vice-directeur

Table des matières

1.	Système PTDU	7
-----------	---------------------	----------

2.	Principes fondamentaux de l'électrotechnique	9
2.1	Circuit électrique	11
2.2	Paramètres	11
2.3	Utilisation du courant alternatif	18
2.4	Caractéristiques d'un réseau alternatif	23
2.5	Caractéristiques des utilisateurs	24

3.	Générateurs	29
3.1	Définitions	31
3.2	Introduction	31
3.3	Machine synchrone	37
3.4	Machine asynchrone triphasée	44

4.	Exploitation des générateurs	55
4.1.	Plaques signalétiques	57
4.2.	Bornier – Couplage	62
4.3.	Fonctionnement en réseau interconnecté	64
4.4	Fonctionnement en réseau isolé	70
4.5.	Anomalies et contrôles	77

5.	Comparaison entre les générateurs synchrone et asynchrone	81
5.1	Qualité de l'énergie électrique	83
5.2	Critères techniques de comparaison	83
5.3	Comparaison des coûts à l'investissement	85

6.	Informations concernant le cahier des charges d'un générateur	87
6.1	Introduction	89
6.2	Informations à soumettre au fournisseur	89
6.3	Documents/informations à recevoir avec l'offre	90
6.4	Vérification des performances	90

7.	Protection et sécurité des installations	91
7.1	Bases légales	93
7.2	Dangers de l'électricité	96
7.3	Protection des installations	100
7.4	Protection des machines tournantes	102
7.5	Obligations juridiques	110

	Bibliographie	115
--	----------------------	------------

	Liste des publications et vidéos du programme d'action PACER	117
--	---	------------

1. Système PTDU

Un schéma de principe d'un système de Production – Transport – Distribution – Utilisation (PTDU) est représenté à la figure 1.1.

Composants du système

• Production

Turbine + Générateur
{
synchrones
asynchrones

Réglage: fréquence – tension – $\cos \varphi$

• Transport

Transformateur élévateur [pas pour des petites centrales]

Ligne

Transformateur abaisseur [pas pour des petites centrales]

• Distribution

Sous-station

et/ou

Système de distribution aux consommateurs

• Utilisateurs

Résistances pures, $\cos \varphi = 1$
éclairage, cuisson, chauffage

Résistances + inductances, $\cos \varphi < 1$
moteurs, transformateurs

A tous les niveaux du système PTDU, il faut que les personnes et le matériel soient protégés.

• Protections

Surcharge – court-circuit – mise à terre

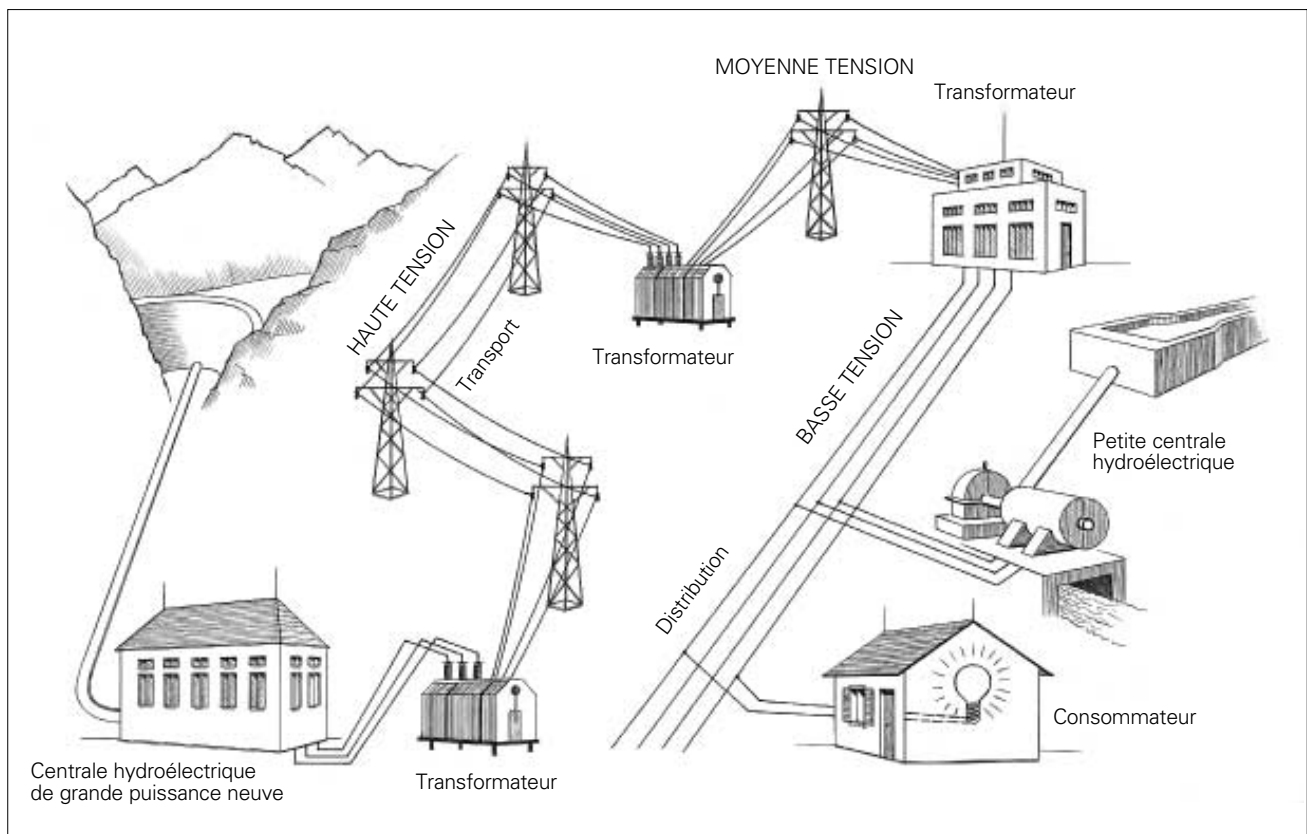


Figure 1.1: Schéma de principe d'un système PTDU

2. Principes fondamentaux de l'électrotechnique

2.1	Circuit électrique	11
------------	---------------------------	----

2.2	Paramètres	11
2.2.1	Tension	11
2.2.2	Courant	12
2.2.3	Fréquence	13
2.2.4	Facteur de puissance $\cos \varphi$	13
2.2.5	Puissance active	14
2.2.6	Puissance réactive	14
2.2.7	Puissance apparente	14
2.2.8	Energie	14
2.2.9	Résistance	15
2.2.10	Condensateur	16
2.2.11	Inductance	16

2.3	Utilisation du courant alternatif	18
2.3.1	Avantages du courant alternatif	18
2.3.2	Généralités et avantages du courant triphasé	18
2.3.3	Génération d'un système triphasé	18
2.3.4	Couplages	19
2.3.4.1	Couplage étoile	20
2.3.4.2	Couplage triangle	21

2.4	Caractéristiques d'un réseau alternatif	23
------------	--	----

2.5	Caractéristiques des utilisateurs	24
2.5.1	Circuit résistif pur	24
2.5.2	Circuit inductif pur	24
2.5.3	Circuit capacitif pur	26
2.5.4	Combinaisons de circuits	27
2.5.5	Impédance	28

2. Principes fondamentaux de l'électrotechnique

2.1 Circuit électrique

Un déplacement d'électrons dans un conducteur crée un courant électrique. L'énergie qui en résulte peut être convertie par des utilisateurs (chaleur, mouvement mécanique, informations...).

Les 3 parties d'un circuit électrique sont: la source, le conducteur, la charge.

On peut faire l'analogie entre circuit électrique et circuit hydraulique (figure 2.1).

2.2 Paramètres

2.2.1 Tension

Les électrons dans un conducteur ne peuvent se déplacer que s'il y a une différence de « pression électrique ».

Cette pression électrique est appelée **tension** et se mesure en volts [V]. La tension est semblable à la différence de pression Δp en hydraulique (figure 2.1).

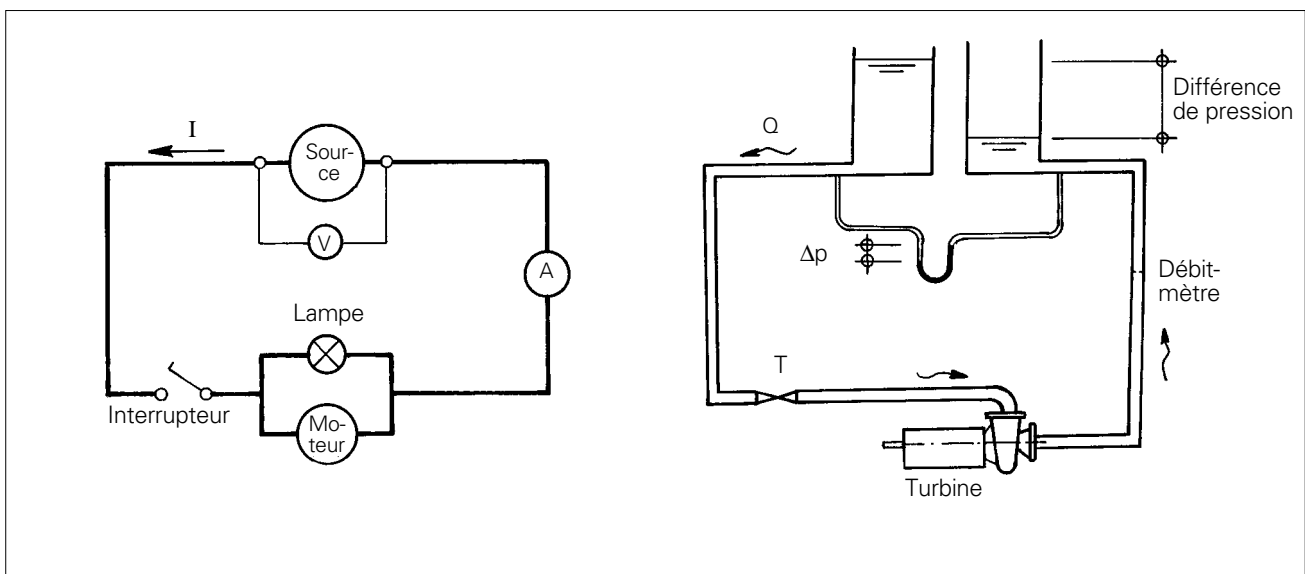


Figure 2.1: Analogie circuit électrique – circuit hydraulique

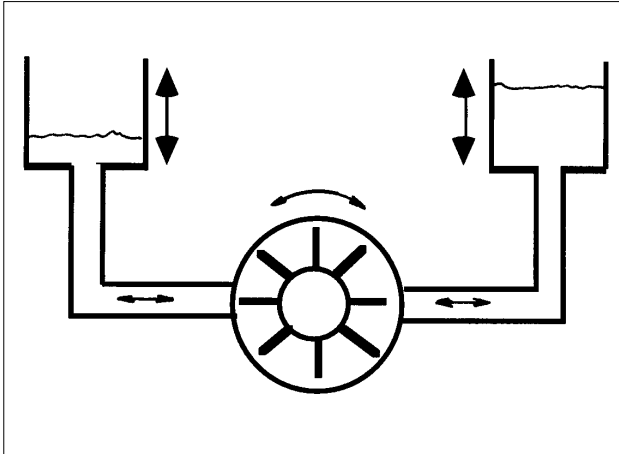


Figure 2.2: Circuit hydraulique alternatif

2.2.2 Courant

S'il y a une tension entre 2 points d'un circuit électrique, un mouvement de charges (électrons) va se créer pour compenser cette différence.

Ce mouvement, appelé **courant**, est comparable au débit hydraulique (figure 2.1); il se mesure en ampères [A].

Lorsque le mouvement de charges est toujours dans le même sens, le courant s'appelle **courant continu**. De même, la tension s'appelle tension continue.

Si ce mouvement alterne d'un sens à un autre, on parle de **courant alternatif** et de tension alternative (figure 2.2).

En régime alternatif, la valeur moyenne est nulle (figure 2.3).

On définit:

- la valeur de crête \hat{U} et \hat{I} ;
- la valeur efficace: $U_{\text{eff}} = \hat{U}/\sqrt{2}$ et $I_{\text{eff}} = \hat{I}/\sqrt{2}$.

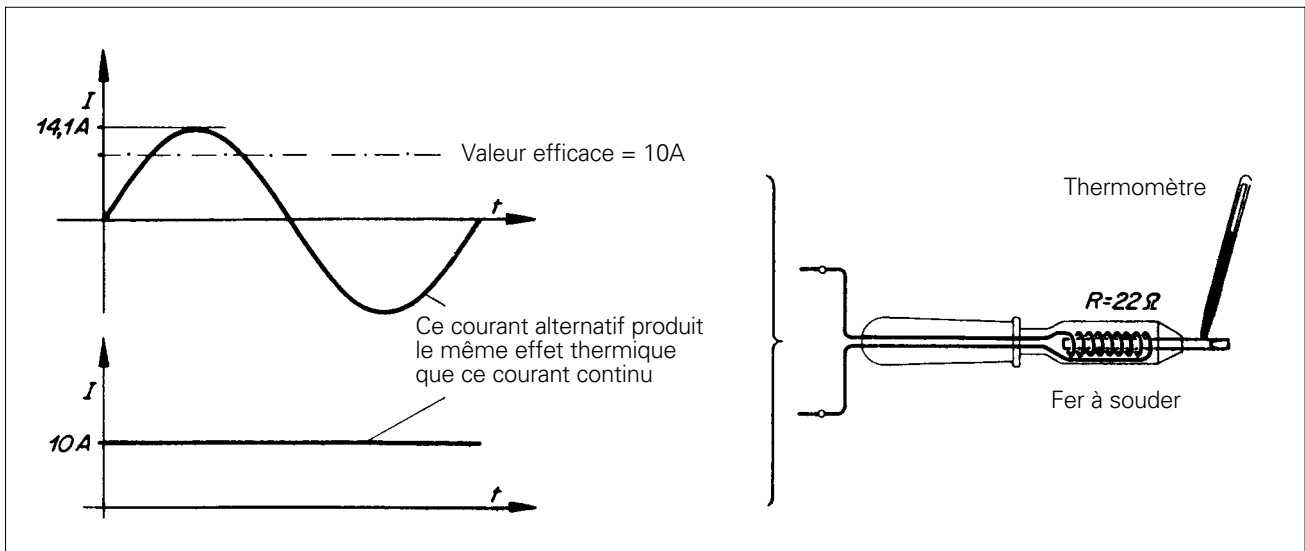


Figure 2.3: Comparaison de signaux continu – alternatif

2.2.3 Fréquence

Le nombre de cycles complets en 1 seconde est appelé fréquence. Elle se mesure en hertz [Hz] (figure 2.4).

La fréquence 50 Hz correspond à 50 cycles par seconde. Le cycle (ou la période) T correspond à une durée de 20 ms.

2.2.4 Facteur de puissance $\cos \varphi$

Certains utilisateurs électriques peuvent créer un retard entre la tension et le courant.

L'instant où le courant est maximum ne correspond pas nécessairement au maximum de tension (figure 2.5).

Sans modification du réseau ou de l'utilisateur, ce retard reste constant. Il est indépendant du temps. Il peut s'exprimer en valeur relative ($\Delta T/T$). Plus généralement, il est exprimé en degré en admettant que la période T représente 360° , c'est l'angle φ . On lui associe presque toujours son cosinus.

Si la fréquence au cours du temps ne varie pas ($f = \text{constante}$), seules les grandeurs \hat{U} , \hat{I} , et φ peuvent se modifier. On peut les représenter plus simplement sur un diagramme appelé phaseur (figure 2.6).

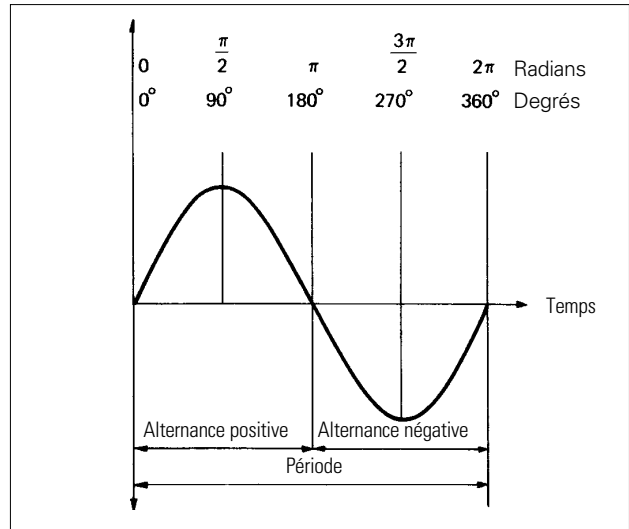


Figure 2.4: Signal alternatif

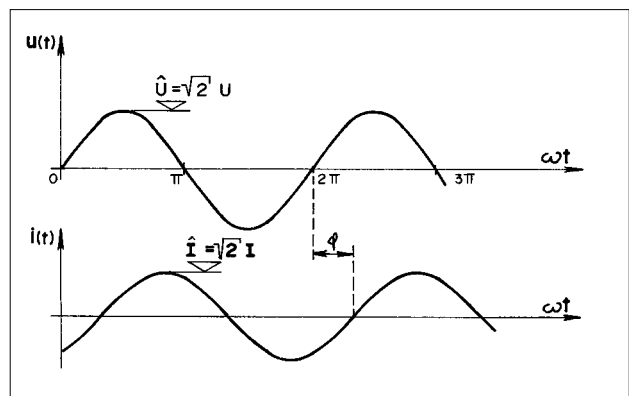


Figure 2.5: Déphasage φ entre U et I

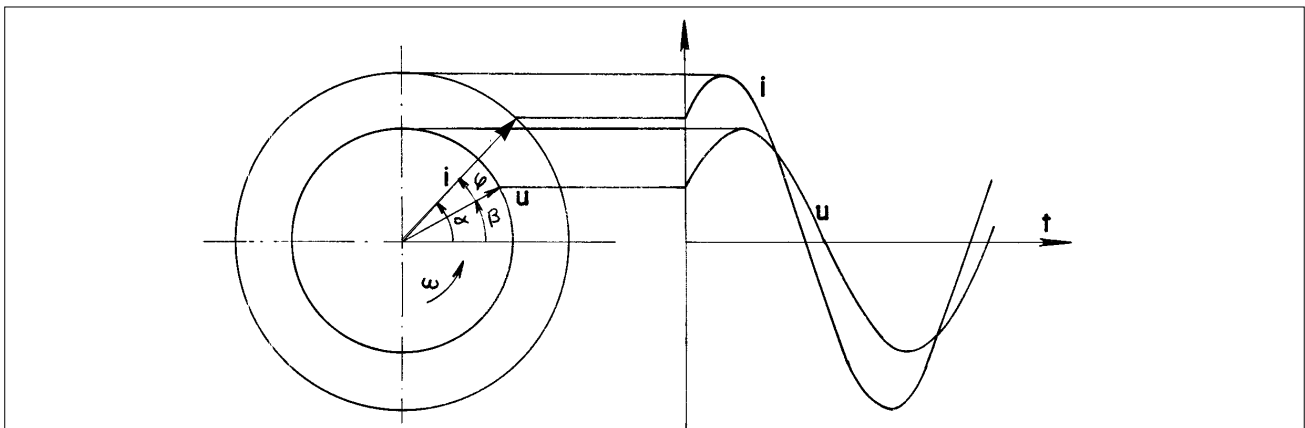


Figure 2.6: Phaseur

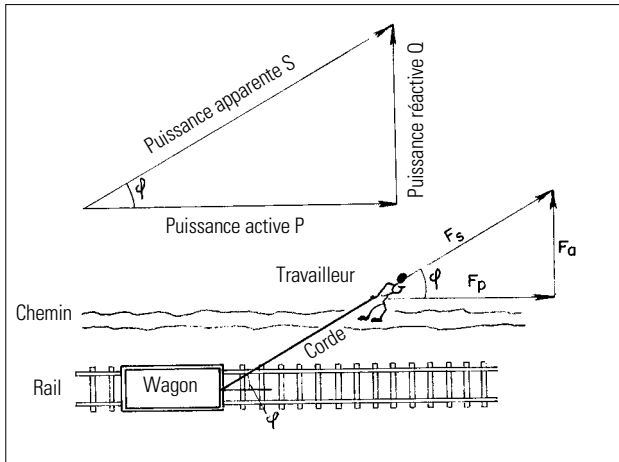


Figure 2.7: Représentation de la puissance

2.2.5 Puissance active

La puissance active est la puissance qui participe à la transformation effective. Cette puissance intéresse l'utilisateur; elle sera convertie en puissance utile, soit thermique (chaleur), mécanique (rotation), chimique (électrolyse). Elle est donnée par (figure 2.7):

$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	(alternatif)	[W]
$P = U \cdot I$	(continu)	[W]

2.2.6 Puissance réactive

La puissance réactive est une puissance nécessaire à la création du champ magnétique dans des inductances ou du champ électrique dans des capacités (figure 2.7):

$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$	(alternatif)	[var]
$Q = 0$	(continu)	[var]

2.2.7 Puissance apparente

La puissance apparente est une puissance qui transite dans la ligne (figure 2.7)

$S = U \cdot I$	(alternatif)	[VA]
$S = U \cdot I$	(continu)	[VA]
$S = (P^2 + Q^2)^{1/2}$		

2.2.8 Energie

L'énergie active est le produit d'une puissance active et d'une durée (temps). Elle s'exprime par :

$E = P \cdot t$	[J]
-----------------	-----

L'unité de l'énergie est le joule qui correspond à une puissance de 1 W pendant 1 s

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}$$

L'unité utilisée pour l'énergie électrique est le [kWh]

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} \\ = 3600 \text{ kJ}$$

2.2.9 Résistance

Symbole: **R**

Unité: **OHM** (Ω)

Comme les pertes par frottements dans un circuit hydraulique, le conducteur oppose une résistance au courant électrique. Cette propriété est nommée résistance R:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad [\Omega]$$

où

l = longueur (m)

A = section du conducteur (mm^2)

ρ = résistivité qui dépend du matériau et de la température

$$\left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$$

La chute de tension dans la résistance est donnée par la loi d'Ohm:

$$U = R \cdot I$$

L'énergie perdue dans la résistance se transforme en chaleur (radiateur, chauffe-eau, fer à souder). La puissance dissipée peut s'exprimer par:

$$P = U \cdot I$$

Or, $U = RI$,

$$\text{donc } P = R \cdot I^2 \text{ ou } P = \frac{U^2}{R}$$

Ces pertes sont appelées **pertes joules** et provoquent un échauffement.

Les matériaux utilisés dans les machines électriques sont essentiellement le cuivre et l'aluminium.

Leur résistivité varie linéairement avec la température. Lorsque la température passe d'une valeur initiale T_0 à une valeur finale T, la résistivité pour le cuivre et l'aluminium varie selon la loi (figure 2.8):

$$\rho_T = \rho_{T_0} \cdot \left(1 + \frac{T - T_0}{235 + T_0} \right)$$

Résistivité du cuivre à 20°C: $0,0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Résistivité de l'aluminium à 20°C: $0,03 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

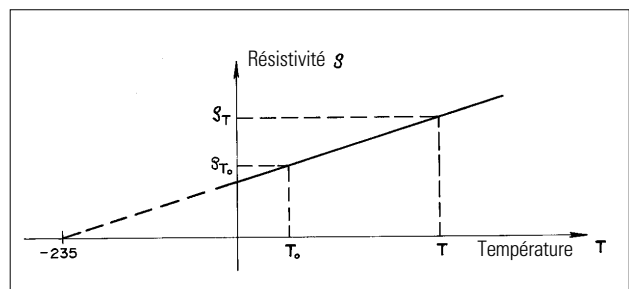


Figure 2.8: Résistivité en fonction de la température

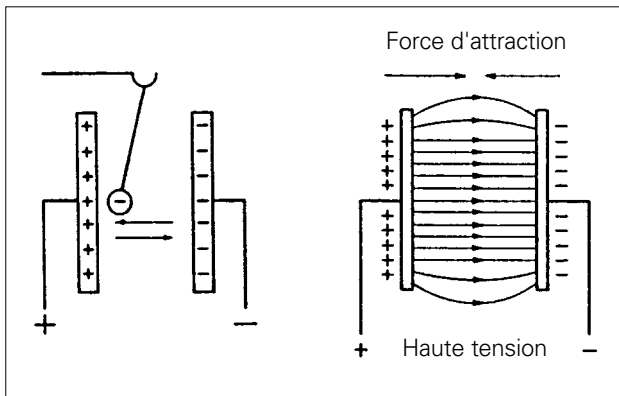


Figure 2.9: Capacité élémentaire

De la même manière, puisque la résistance R est proportionnelle à la résistivité ρ :

$$R_T = R_{T_0} \cdot \left(1 + \frac{T - T_0}{235 + T_0} \right)$$

2.2.10 Condensateur

Symbole: **C**

Unité: **FARAD (F)**

Soient deux plaques métalliques placées face à face. Lorsqu'on applique une tension continue entre ces deux plaques, il apparaît une accumulation de charges électriques positives sur l'une des plaques et négatives sur l'autre. Les deux plaques constituent un condensateur élémentaire (figure 2.9).

La capacité C du condensateur est le rapport entre la charge Q et la tension appliquée U:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (\text{F}) \quad \left(\text{F} = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} \right)$$

Dans la pratique les condensateurs utilisés ont des capacités très petites. C'est pourquoi l'unité utilisée est le microfarad (μF) ou le picofarad (pF). Un condensateur de 1 farad a une capacité telle que s'il est chargé avec 1 ampère pendant 1 seconde, sa tension croît de 1 volt.

2.2.11 Inductance

Symbole: **L**

Unité: **HENRY (H)**

L'inductance **L** d'une bobine est le facteur de proportionnalité entre le flux magnétique et le courant qui lui est associé:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (\text{H}) \quad \left(\text{H} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} \right)$$

L'unité de l'inductance est le henry. C'est la valeur d'une bobine (relais, self d'amorçage de néon) telle que, pour une tension de 1 volt appliquée pendant 1 seconde, le courant varie de 1 ampère.

La bobine possède une résistance R et une inductance propre L. Ces deux éléments peuvent être

considérés en série. La tension totale aux bornes de la bobine est de la forme :

$$U = R \cdot I + L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Une bobine d'inductance L tend à s'opposer à une variation du courant qui la traverse.

Lors de l'enclenchement d'une source de tension continue U_0 sur un circuit composé d'une résistance R et d'une inductance L en série (figure 2.10), le courant met un certain temps à atteindre la valeur régie par la loi d'Ohm : $I = U_0/R$

Le courant i s'établit selon une loi exponentielle (figure 2.11) avec une **constante de temps** τ définie par :

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (\text{s})$$

La tension u_L aux bornes de l'inductance a la valeur U_0 au premier instant, puis elle décroît de façon exponentielle jusqu'à 0 avec la même constante de temps τ .

La tension u_R aux bornes de la résistance est nulle au premier instant et augmente de façon exponentielle pour atteindre la valeur U_0 .

Une bobine d'inductance peut être alimentée en courant continu ou en courant alternatif. Si l'inductance est idéale, c'est-à-dire que sa résistance est nulle, alors elle représente un court-circuit en courant continu.

L'inductance L emmagasine une énergie **magnétique** W :

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (\text{J})$$

Cette énergie n'est pas transformée en chaleur.

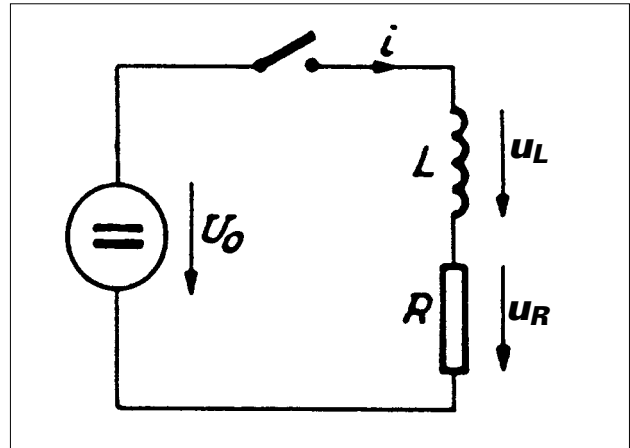


Figure 2.10: Schéma d'un circuit inductif

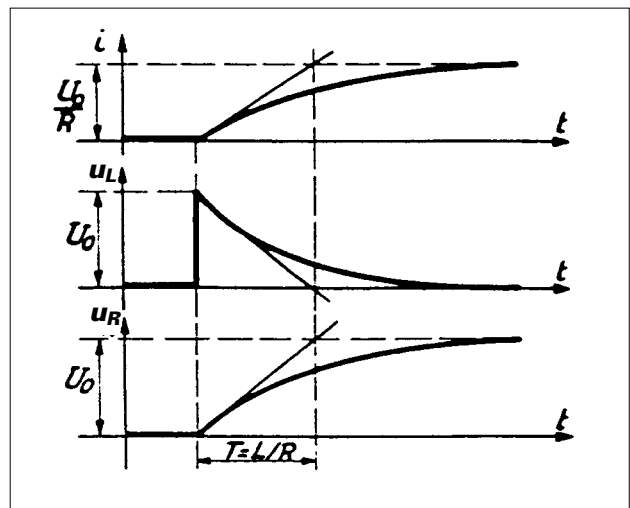


Figure 2.11: Etablissement du courant et des tensions dans un circuit inductif

2.3 Utilisation du courant alternatif

2.3.1 Avantages du courant alternatif

Le courant alternatif présente certains avantages par rapport au courant continu :

- faible coût de transport ;
- transformation facile ;
- moteurs et générateurs alternatifs plus faciles à construire ;
- éléments d'enclenchement et de coupure plus simples.

2.3.2 Généralités et avantages du courant triphasé

La production et la distribution en monophasé n'est valable que dans le cas de petites puissances (<5kW). Pour des puissances plus élevées, les réseaux sont triphasés.

Par rapport au monophasé, le système triphasé permet d'avoir des appareils de dimensions plus réduites. Il est donc plus économique.

Il permet de générer facilement un champ tournant qui sera ensuite exploité dans des moteurs.

Le transport d'énergie par lignes triphasées est plus économique en matériaux qu'une ligne monophasée ou continue.

2.3.3 Génération d'un système triphasé

Un système triphasé de courants (ou de tensions) est en fait le résultat de 3 courants (ou de 3 tensions) monophasés qui sont déphasés les uns par rapport aux autres de 120° (ou $2\pi/3$ radian) selon la figure 2.12.

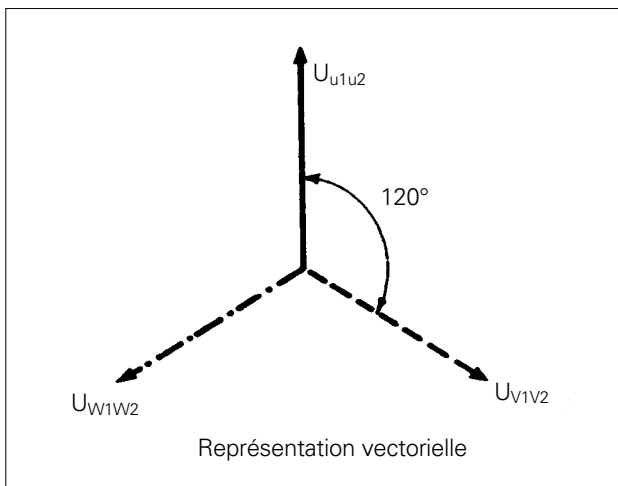


Figure 2.12: Déphasage entre les 3 tensions triphasées

Il suffit donc, pour avoir un tel système, de considérer une machine bipolaire composée d'un rotor à 2 pôles (N/S) et d'un stator comprenant 3 bobines déphasées l'une par rapport à l'autre de 120° . Les figures 2.13 et 2.14 représentent une telle machine ainsi que les 3 sinusoïdes engendrées par la rotation du rotor dans le stator.

- **Tensions de phase**

Ce sont les tensions aux bornes des bobines :

$$U_{u1u2} - U_{v1v2} - U_{w1w2}$$

- **Tensions simples**

Ce sont les tensions entre les entrées des bobines et le point neutre :

$$U_{u1N} - U_{v1N} - U_{w1N} \text{ ou } U_{L1N} - U_{L2N} - U_{L3N}$$

- **Tensions de ligne ou tensions composées**

Ce sont les tensions entre deux entrées de bobine ou entre deux lignes du réseau (ou de la charge) :

$$U_{u1v1} - U_{v1w1} - U_{w1u1} \text{ ou } U_{L1L2} - U_{L2L3} - U_{L3L1}$$

- **Courants de phase**

Ce sont les courants qui traversent les bobinages (générateurs, moteurs,...) ou les phases d'une charge triphasée :

$$I_{u1} - I_{v1} - I_{w1}$$

- **Courants de ligne**

Ce sont les courants qui traversent les connexions entre le réseau et la charge: I_{ligne}

2.3.4 Couplages

Les couplages les plus utilisés pour les générateurs, les moteurs et les charges triphasées sont :

- **le couplage étoile;**
- **le couplage triangle.**

Il est important de connaître dans ces deux couplages :

- les relations entre tensions simples et composées;
- les relations entre courants de phase et de ligne;
- les expressions des puissances.

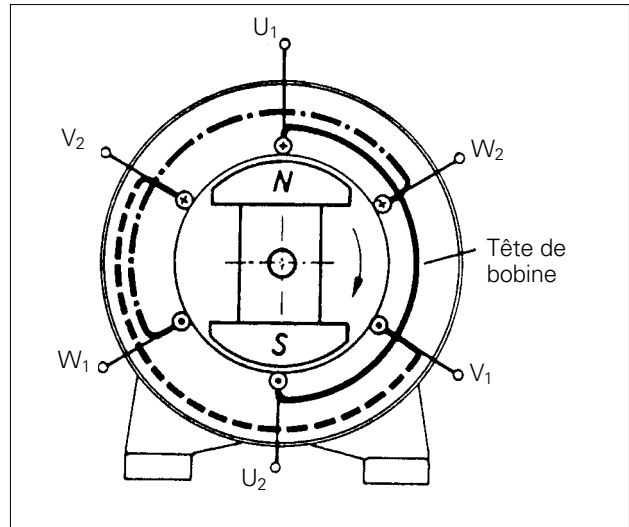


Figure 2.13 : Alternateur triphasé

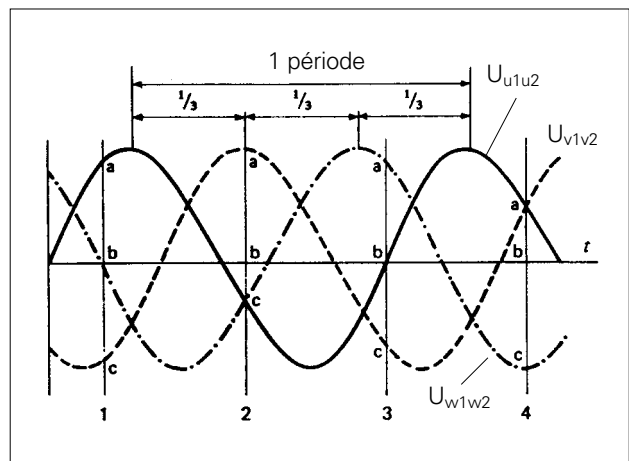


Figure 2.14: Les 3 tensions générées par l'alternateur

2.3.4.1 Couplage étoile

Symbole : **Y**

Le couplage étoile est obtenu en reliant les unes aux autres les sorties des trois phases $U_2 - V_2 - W_2$. Avec le couplage étoile, le point neutre peut être accessible (figure 2.15).

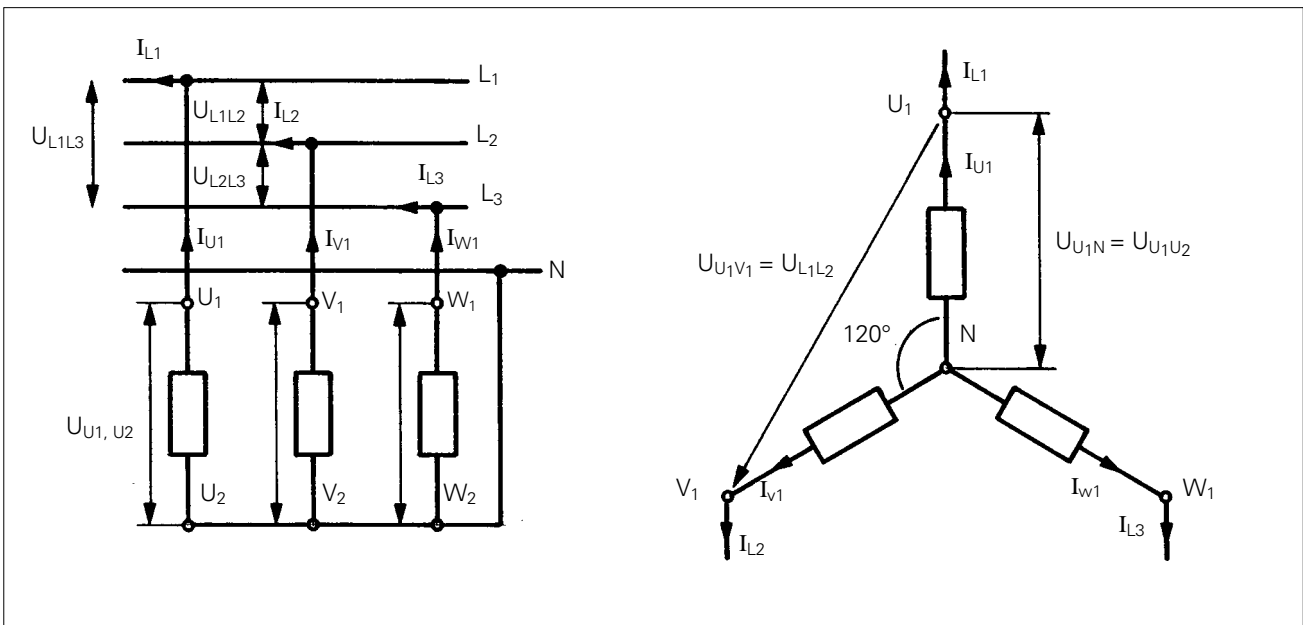


Figure 2.15: Couplage étoile

- **Tensions**

$$U_{L1L2} = U_{U1V1} = \sqrt{3} \cdot U_{U1U2}$$

- **Courants**

Le courant de phase est égal au courant de ligne:

$$I_{L1} = I_{U1} \quad I_{L2} = I_{V1} \quad I_{L3} = I_{W1}$$

- **Puissances**

Puisqu'un système triphasé est équivalent à trois systèmes monophasés, on peut écrire:

pour la puissance apparente:

$$S = 3 \cdot U_{\text{phase}} \cdot I_{\text{phase}} \quad (\text{VA})$$

De même pour la puissance active, on a:

$$P = 3 \cdot U_{\text{phase}} \cdot I_{\text{phase}} \cdot \cos \varphi \quad (\text{W})$$

et pour la puissance réactive:

$$Q = 3 \cdot U_{\text{phase}} \cdot I_{\text{phase}} \cdot \sin \varphi \quad (\text{var})$$

En se référant aux relations de tensions où :

$$U_{\text{phase}} = \frac{U_{\text{composée}}}{\sqrt{3}}$$

et puisque le courant de phase est égal au courant de ligne :

$$I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}}$$

alors :

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \quad (\text{VA})$$

De même pour la puissance active, on a :

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \cos \varphi \quad (\text{W})$$

et pour la puissance réactive :

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \sin \varphi \quad (\text{var})$$

– **Impédance** (voir § 2.5.5)

L'impédance

$$Z_{\text{phase}} = \frac{U_{\text{phase}}}{I_{\text{phase}}}$$

devient, dans ce cas de couplage étoile :

$$Z_{Y\text{phase}} = \frac{U_{\text{ligne}}}{\sqrt{3}I_{\text{ligne}}}$$

2.3.4.2 Couplage triangle

Symbole: Δ

Le couplage triangle est obtenu en reliant la sortie de chaque phase $U_2 - V_2 - W_2$, à l'entrée de chaque phase consécutive (figure 2.16).

– **Tensions**

La tension de phase est égale à la tension de ligne :

$$U_{U_1U_2} = U_{U_1V_1} = U_{L_1L_2}$$

– **Courants**

$$I_{L_1} = \sqrt{3} \cdot I_{U_1}$$

– **Puissances**

Partant de l'expression générale de la puissance apparente

$$S = 3 \cdot U_{\text{phase}} \cdot I_{\text{phase}}$$

et en se référant aux relations de tensions et de courants pour ce couplage, on trouve :

$$S = \sqrt{3} U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \quad (\text{VA})$$

Cette expression est identique à celle pour le couplage étoile.

– **Impédance** (voir § 2.5.5)

L'impédance

$$Z_{\text{phase}} = \frac{U_{\text{phase}}}{I_{\text{phase}}}$$

devient, dans ce cas de couplage triangle :

$$Z_{\Delta\text{phase}} = \frac{U_{\text{ligne}}}{\frac{I_{\text{ligne}}}{\sqrt{3}}}$$

$$Z_{\Delta\text{phase}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}}}{I_{\text{ligne}}}$$

En comparant avec $Z_{Y\text{phase}}$, pour avoir les mêmes valeurs de tension et de courant, l'impédance de phase dans le couplage triangle est 3 fois plus grande que l'impédance correspondant au couplage étoile :

$$Z_{\Delta} = 3 \cdot Z_Y$$

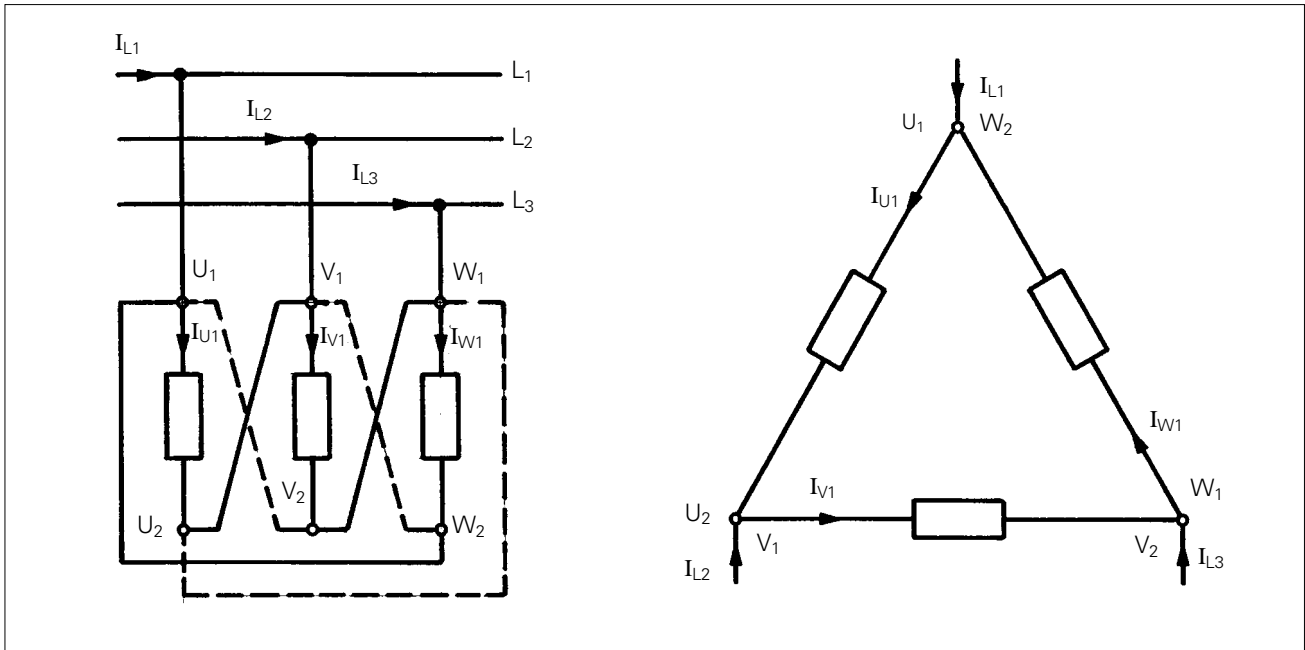


Figure 2.16: Couplage triangle

2.4 Caractéristiques d'un réseau alternatif

Un réseau électrique est caractérisé par :

- le nombre de phases ;
- la tension U ;
- la fréquence f ;
- la puissance de transfert.

Exemple :

réseau triphasé, $3 \times 400 \text{ V} / 230 \text{ V} - 50 \text{ Hz} - 10 \text{ kVA}$

La tolérance sur la tension est de $\pm 10\%$.

Une grandeur importante pour la production d'énergie par microcentrale est la chute de tension dans la ligne. Pour une ligne et une puissance de transfert données, la production devra compenser la chute de tension dans la ligne, ce qui peut entraîner une tension trop élevée chez l'autoprodacteur-utilisateur.

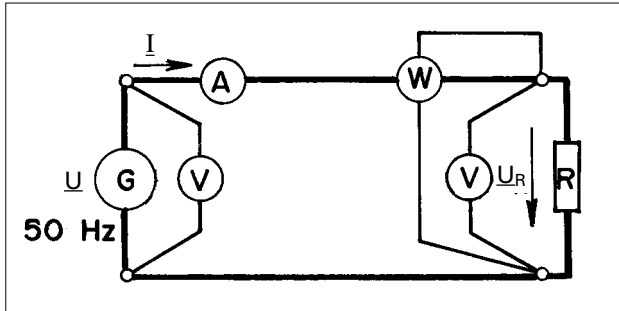


Figure 2.17: Schéma d'alimentation d'une résistance

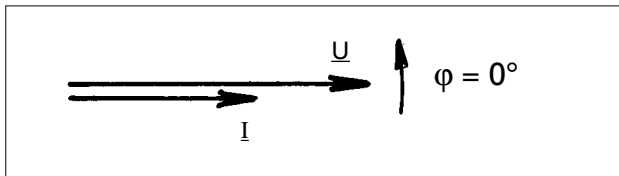


Figure 2.18: Déphasage entre la tension et le courant pour un circuit résistif

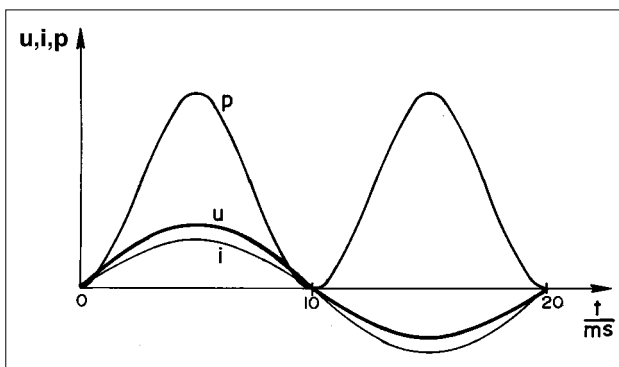


Figure 2.19: Courbes des tension, courant et puissance pour une résistance

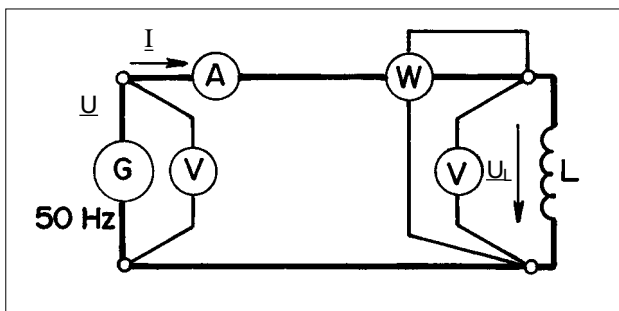


Figure 2.20: Schéma d'alimentation d'une self

2.5 Caractéristiques des utilisateurs

L'utilisateur est caractérisé par :

- la tension U ;
- la fréquence f ;
- la puissance active P ;
- le $\cos \varphi$.

2.5.1 Circuit résistif pur

Soit une résistance R alimentée par une tension efficace U et traversée par un courant efficace I selon la figure 2.17.

Le courant et la tension sont en phase (figure 2.18). $\varphi = 0$; d'où : $\cos \varphi = 1$ et $\sin \varphi = 0$

La figure 2.19 représente les valeurs instantanées de tension, de courant et de puissance.

La loi d'Ohm est, dans ce cas, valable comme en courant continu :

$$U = R \cdot I \quad (V)$$

La puissance active, selon les définitions ci-dessus, est égale à :

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I = S$$

D'où :

$$P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (W)$$

La puissance réactive est nulle :

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 0 \text{ puisque } \sin \varphi = 0$$

2.5.2 Circuit inductif pur

Soit une bobine ayant une inductance L et qui est alimentée par une tension efficace U selon le schéma de la figure 2.20.

Le courant et la tension sont déphasés de $+90^\circ$, ou $+\pi/2$ radians, (figure 2.21).

$$\varphi = +\pi/2 \text{ d'où : } \cos \varphi = 0 \text{ et } \sin \varphi = +1$$

Les valeurs instantanées de tension, de courant et de puissance sont représentées sur la figure 2.22.

On remarque que la tension est en avance sur le courant de $\pi/2$, c'est-à-dire que la tension atteint sa valeur maximum (de crête) avant le courant.

Le courant est limité par ce qu'on appelle la *réactance inductive*.

Réactance inductive X_L

C'est la résistance en courant alternatif dans le cas d'une inductance. L'unité de la réactance est donc la même que celle de la résistance (Ω).

La réactance inductive est le produit de la pulsation ω par la valeur de la self L :

$$X_L = \omega L = 2 \pi f \cdot L \quad (\Omega)$$

où f est la fréquence de la tension et du courant.

On peut donc écrire :

$$U = X_L \cdot I = \omega \cdot L \cdot I \quad (V)$$

Si $f = 0$, $U = 0$ et le circuit est en court-circuit. C'est le cas en courant continu avec une inductance pure.

Si $f = \infty$, $I = 0$ et le circuit est ouvert.

D'après la figure 2.22, on voit que la puissance instantanée fluctue autour de la valeur moyenne nulle. Pendant un quart de période, elle est positive et l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie magnétique et pendant le quart de période suivant, cette énergie magnétique est renvoyée à la source.

La puissance active est donc nulle.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 0$$

Par contre, il existe une puissance réactive :

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I \quad (\text{var})$$

$$Q = X_L \cdot I^2 = \omega \cdot L \cdot I^2 = U^2 / X_L \quad (\text{var})$$

Une inductance absorbe de l'énergie réactive.

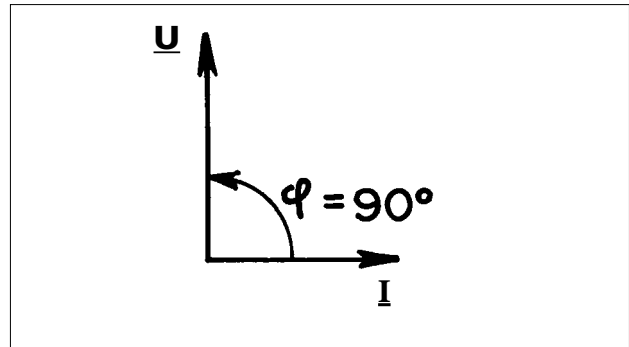


Figure 2.21 : Déphasage entre la tension et le courant pour une self

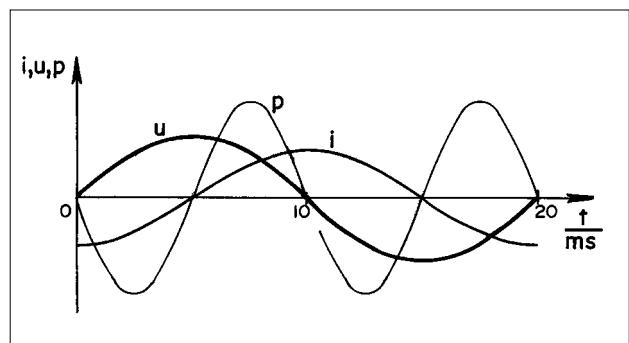


Figure 2.22 : Courbes des tensions, courant et puissance pour une self

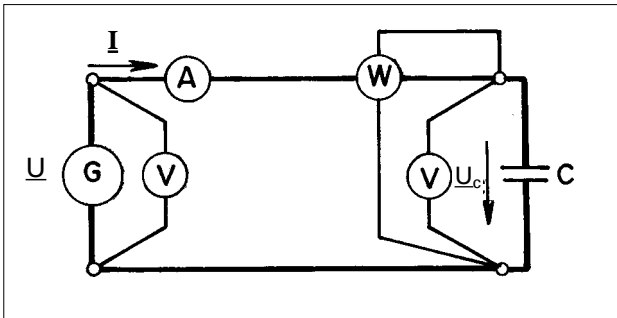


Figure 2.23: Schéma d'alimentation d'une capacité

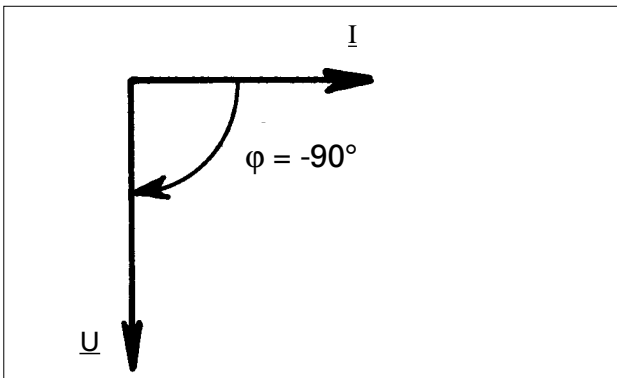


Figure 2.24: Déphasage entre la tension et le courant pour un circuit capacitif

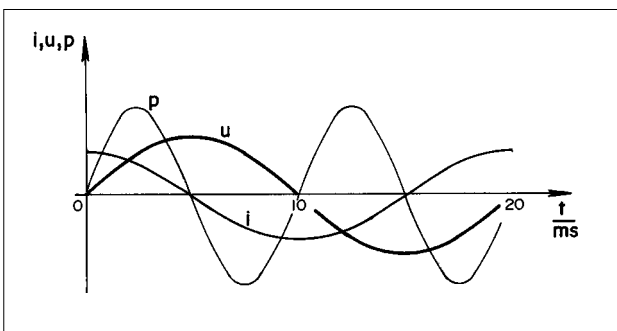


Figure 2.25: Courbes des tensions, courant et puissance pour une capacité

2.5.3 Circuit capacitif pur

Soit un condensateur C alimenté par une tension efficace U selon le schéma de la figure 2.23.

Le courant et la tension sont déphasés de -90° , ou $-\pi/2$ radians (figure 2.24).

$$\varphi = -\pi/2$$

d'où: $\cos \varphi = 0$ et $\sin \varphi = -1$

Les valeurs instantanées de tension, de courant et de puissance sont représentés sur la figure 2.25. On remarque que la tension est en retard sur le courant de $\pi/2$, c'est-à-dire que la tension atteint sa valeur maximum (de crête) après le courant.

Le courant est limité par ce qu'on appelle la réactance capacitive.

Réactance capacitive X_c

C'est la résistance en courant alternatif dans le cas d'une capacité. L'unité de la réactance est donc la même que celle de la résistance (Ω).

La réactance capacitive est l'inverse du produit de la pulsation ω par la valeur de la capacité C :

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (\Omega)$$

où f est la fréquence de la tension et du courant.

On peut donc écrire :

$$U_c = X_c \cdot I = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I \quad (V)$$

Si $f = \infty$, $U = 0$ et le circuit est en court-circuit.

Si $f = 0$, $I = 0$ et le circuit est ouvert. C'est le cas en courant continu. Le condensateur bloque le courant.

D'après la figure 2.25, on voit que la puissance instantanée fluctue autour de la valeur moyenne nulle. Pendant un quart de période, elle est positive et l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie électrostatique et, pendant le quart de période suivant, cette énergie électrostatique est renvoyée à la source. En courant alternatif, le condensateur laisse passer le courant.

La puissance active est donc nulle:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 0 \quad (\text{W})$$

Par contre, il existe une puissance réactive:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I \quad (\text{var})$$

$$Q = X_c \cdot I^2 = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I^2$$

$$Q = \frac{U^2}{X_c} = \omega \cdot C \cdot U^2$$

Un condensateur fournit de l'énergie réactive.

2.5.4 Combinaisons de circuits

Résistance et inductance en série (figure 2.26).

On part du triangle des puissances (figure 2.7) défini par:

- la puissance apparente $S = U \cdot I$
- la puissance active $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$
- la puissance réactive $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$

où φ est l'angle de déphasage entre le courant et la tension.

En divisant chaque côté par le courant I , on obtient un triangle de tension (figure 2.27):

$$U_R = U \cdot \cos \varphi$$

$$U_L = U \cdot \sin \varphi$$

U_R et I sont en phase

U_L et I sont déphasés de $+90^\circ$ ou $+\pi/2$ radians

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

En divisant les côtés de ce triangle une nouvelle fois par I , on obtient un triangle d'impédances (figure 2.28)

$$AB = Z = \frac{U}{I} \quad (\text{voir par. 2.5.5})$$

$$BC = R = Z \cos \varphi = \frac{U}{I} \cos \varphi \quad (\Omega)$$

$$AC = X_L = \omega L = Z \sin \varphi = \frac{U}{I} \sin \varphi \quad (\Omega) \quad (\omega = 2\pi f)$$

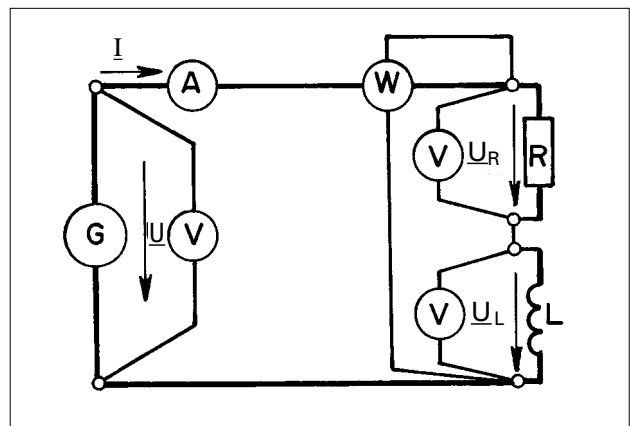


Figure 2.26: Circuit composé d'une résistance et d'une self

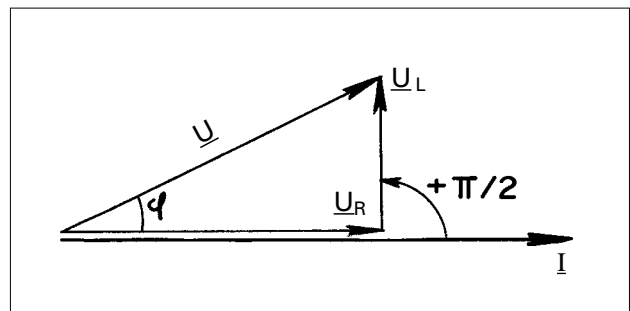


Figure 2.27: Diagramme des tensions

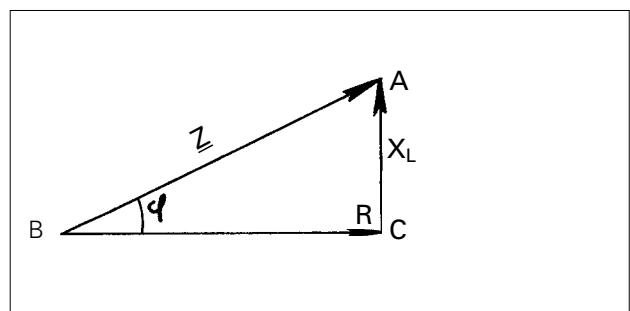


Figure 2.28: Diagramme des impédances

2.5.5 Impédance

Symbole: **Z**
Unité: **OHM** (Ω)

L'impédance Z d'un circuit alimenté par une tension et un courant alternatifs est donc le rapport entre les valeurs efficaces de tension U et de courant I .

Elle est composée d'un terme résistif R et d'un terme réactif X .

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\Omega)$$

N.B. L'inverse de l'impédance ($1/Z$) est l'**admittance Y** dont l'unité est le siemens (S) = ($1/\Omega$).

3. Générateurs

3.1	Définitions	31
<hr/>		
3.2	Introduction	31
3.2.1	Champ magnétique	31
3.2.2	Flux magnétique	33
3.2.3	Induction magnétique	33
3.2.4	Création d'une force électromagnétique	34
3.2.5	Tension induite	35
3.2.6	Tension induite de mouvement ou de rotation	
	Génératrice élémentaire	36
3.2.7	Courants de Foucault	36
<hr/>		
3.3	Machine synchrone	37
3.3.1	Généralités	37
3.3.2	Principe	38
3.3.3	Bilan des puissances – Rendement	41
3.3.4	Symbole	41
3.3.5	Tension induite dans les machines synchrones	42
3.3.6	Caractéristiques en générateur	42
3.3.7	Exercices	43
<hr/>		
3.4	Machine asynchrone triphasée	44
3.4.1	Généralités	44
3.4.2	Principe	44
3.4.3	Symbole	46
3.4.4	Couple électromagnétique	46
3.4.5	Puissances et couple	47
3.4.6	Caractéristiques	50
3.4.7	Fonctionnement en génératrice	52
3.4.8	Exercices	53

3. Générateurs

3.1 Définitions

Un **générateur électromécanique** convertit l'énergie mécanique qu'il reçoit à son arbre (turbine) en énergie électrique distribuée au consommateur. Il s'agit de **l'énergie active**.

Le consommateur peut être :

- le réseau interconnecté qui fixe la tension et la fréquence ;
- un réseau isolé auquel le producteur doit garantir une tension ainsi qu'une fréquence qui doivent être toutes deux fixes et stables dans une fourchette admissible pour les appareils du consommateur.

Dans les installations de production d'énergie électrique de petite dimension, il y a lieu de choisir entre deux types de générateurs :

- le générateur **synchrone** ;
- le générateur **asynchrone**.

Dans les deux cas :

- la machine est composée d'un rotor et d'un stator ;
- le bobinage au stator, en général triphasé, est le siège d'une tension induite aux bornes de chaque phase.

3.2 Introduction

3.2.1 Champ magnétique

Symbole : **H**

Unité : **AMPÈRE PAR MÈTRE** (A/m)

Soit un aimant permanent suspendu de façon à ce qu'il puisse s'orienter librement (figure 3.1) :

- l'extrémité de l'aimant qui s'oriente vers le nord géographique est désigné par « **pôle nord** » ;
- l'extrémité de l'aimant qui s'oriente vers le sud géographique est désigné par « **pôle sud** ».

L'aimant permanent crée autour de lui un champ magnétique.

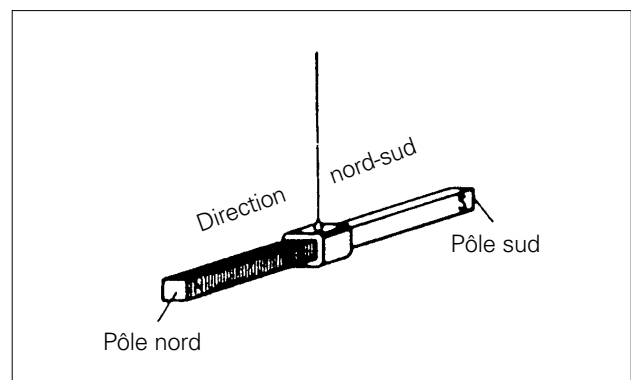


Figure 3.1: Aimant suspendu

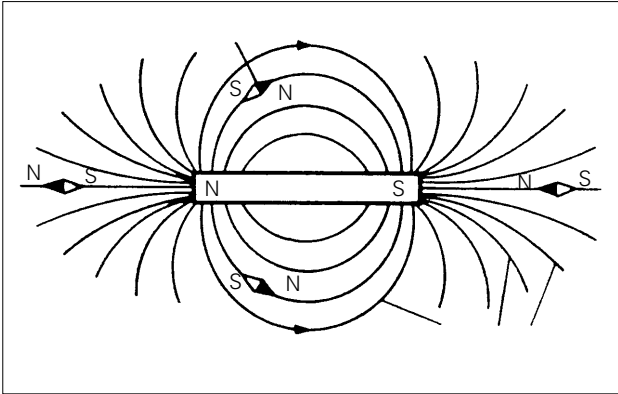


Figure 3.2: Lignes de champ

En saupoudrant de la limaille de fer autour de l'aimant, on met en évidence l'existence de lignes de champ magnétique (spectre magnétique). La limaille de fer se concentre autour des pôles (figure 3.3).

Les lignes de champ sortent du pôle nord de l'aimant et y retournent par le pôle sud. Elles se referment au travers de l'aimant (figure 3.2).

- des pôles de même nom se repoussent (figure 3.4);
- des pôles de nom contraire s'attirent (figure 3.5).

• **Pièce de fer dans un champ magnétique**

La présence de fer dans un circuit magnétique déforme le champ: les lignes de champ se concentrent dans la pièce de fer (figure 3.6).

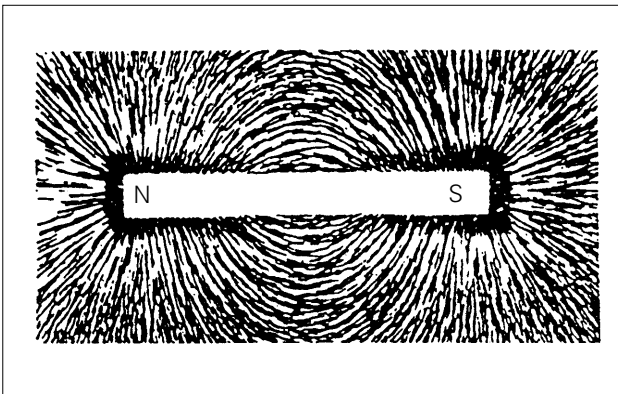


Figure 3.3: Création d'un champ par un aimant

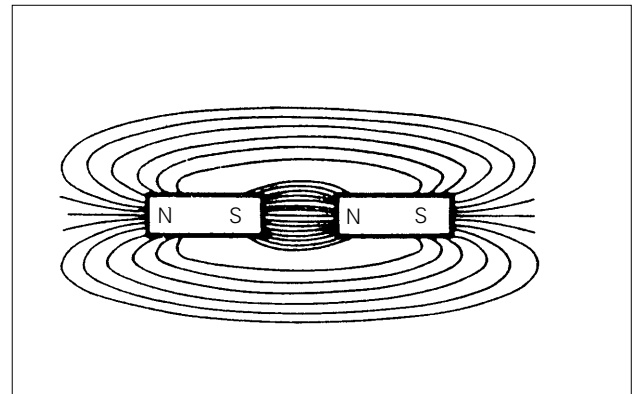


Figure 3.5: Attraction

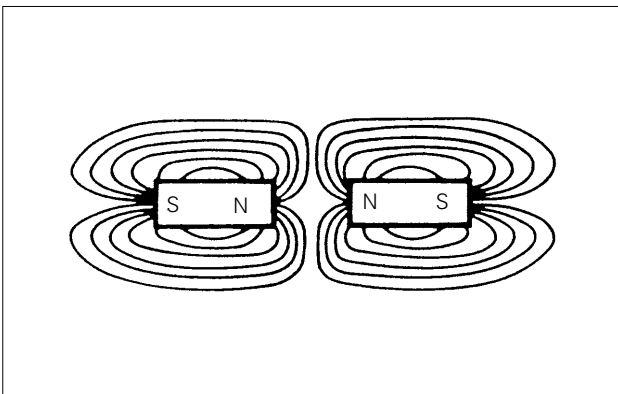


Figure 3.4: Répulsion

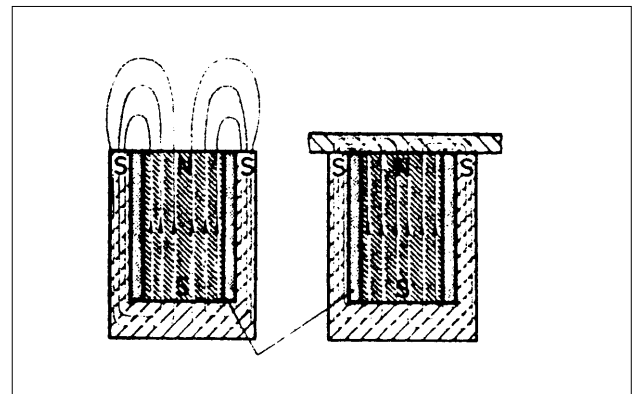


Figure 3.6: Lignes de champ dans une pièce de fer

• **Champ magnétique créé par un courant dans une bobine**

Un conducteur parcouru par un courant engendre un champ magnétique. Le sens des lignes de champ dépend du sens du courant (figure 3.7).

Un courant I traversant une bobine, constituée d'un nombre N de spires, crée un champ magnétique. C'est un électroaimant (figure 3.8).

L'amplitude du champ H dépend de :

- de l'amplitude du courant I ;
- du nombre de spires N ;
- de la longueur moyenne l des lignes de champ.

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad \left(\frac{A}{m} \right)$$

Le produit $N \cdot I$ est le « **potentiel magnétique** » ou « **solénation** » θ .

3.2.2 Flux magnétique

Symbole: Φ
Unité: **WEBER** (Wb)

Soit une bobine de N spires (figure 3.8). Lorsque la bobine est parcourue par un courant I , on crée des lignes de champ magnétique. L'ensemble des lignes de champ est le flux Φ .

3.2.3 Induction magnétique

Symbole: **B**
Unité: **TESLA** (T) = (Wb/m²)

L'induction magnétique est le flux par unité de surface de passage de ce flux.

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (T)$$

Sur la figure 3.9: $A = 25 \text{ cm}^2 = 0,0025 \text{ m}^2$
Si $\Phi = 0,0025 \text{ Wb}$
alors $B = 1 \text{ T}$

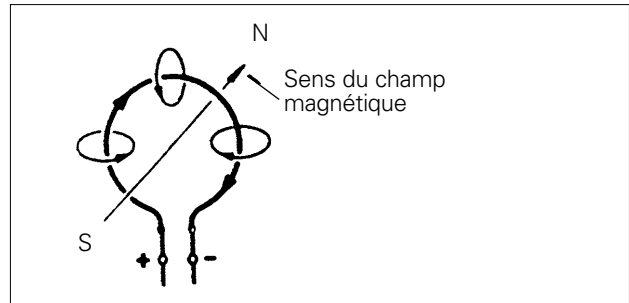


Figure 3.7: Champ magnétique créé par un courant

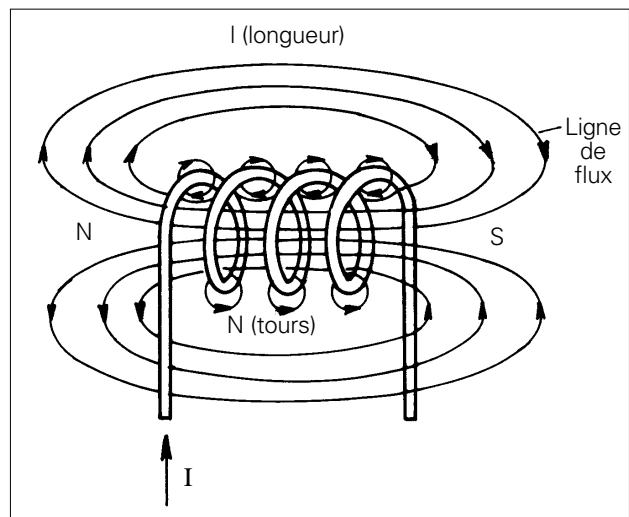


Figure 3.8: Champ créé par une bobine

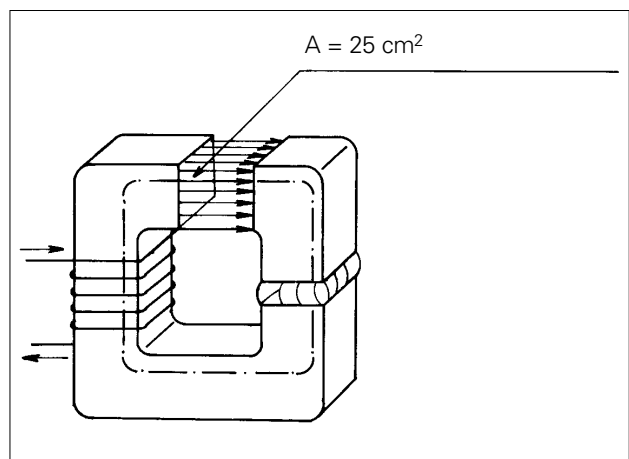


Figure 3.9: Exemple

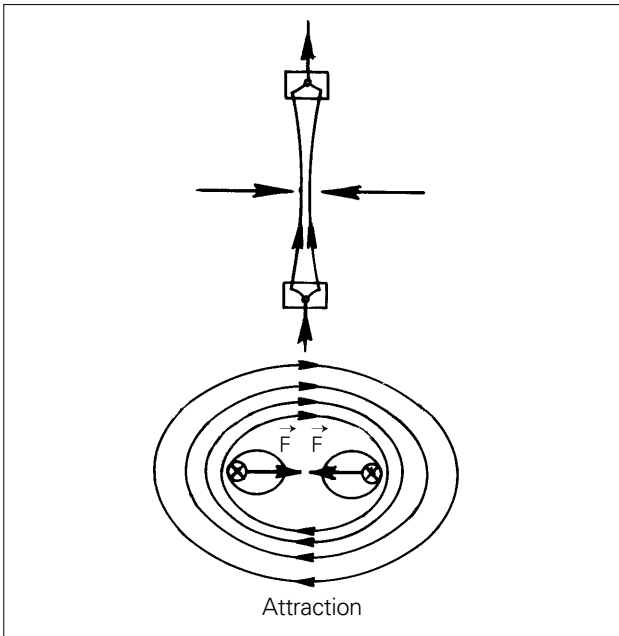


Figure 3.10: Forces d'attraction créées par deux courants

3.2.4 Création d'une force électromagnétique

• Interaction de 2 courants

- Deux conducteurs parcourus par des courants de même sens s'attirent (figure 3.10).
- Deux conducteurs parcourus par des courants de sens contraire se repoussent (figure 3.11).

• Interaction d'un courant et d'un champ magnétique

Soit un conducteur traversé par un courant I et placé dans un champ d'induction B (créé par un aimant permanent par exemple) perpendiculaire au conducteur (figure 3.12).

Une force F est alors exercée sur le conducteur créant un déplacement de celui-ci.

La force est proportionnelle:

- à l'induction moyenne B ;
- au courant I circulant dans le conducteur;
- à la longueur utile l du conducteur.

Si le conducteur est perpendiculaire à l'induction B :

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (\text{N})$$

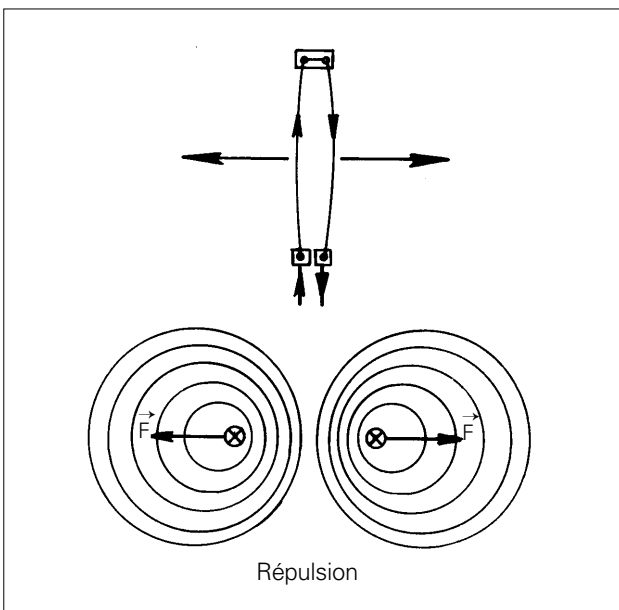


Figure 3.11: Forces de répulsion créées par deux courants

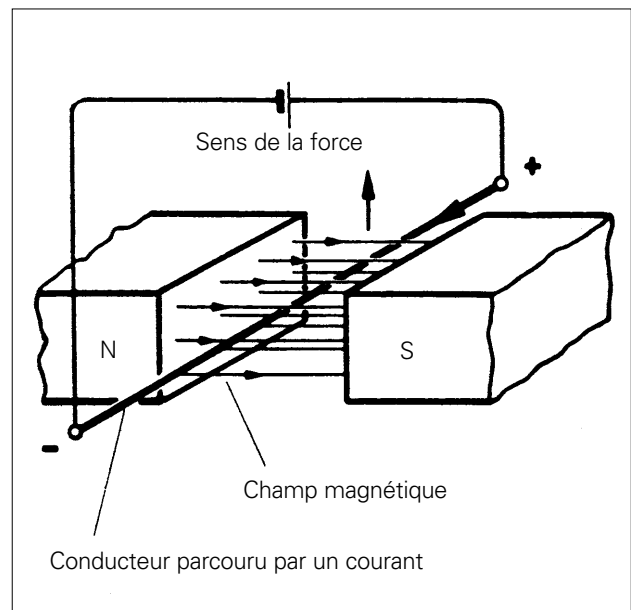


Figure 3.12: Force due à l'interaction d'un courant et d'un champ magnétique

Le sens de la force est déterminé selon la règle de la main gauche. Il dépend du sens du courant et du sens des lignes de champ (figure 3.13).

3.2.5 Tension induite

Soit un aimant permanent créant un champ magnétique d'induction B dont le sens va du pôle nord N au pôle sud S . Un conducteur de longueur l est placé entre les pôles de l'aimant de façon à ce qu'il coupe perpendiculairement les lignes de champ magnétique. Ce conducteur est relié à un voltmètre. Lorsqu'on déplace le conducteur à une vitesse v , on constate une déviation du voltmètre (figure 3.14). La tension ainsi obtenue est la **tension induite**.

Cette tension induite est proportionnelle à :

- l'induction B qui traverse le conducteur;
- la vitesse v du conducteur;
- la longueur l du conducteur.

$$U_i = B \cdot l \cdot v \quad (\text{V})$$

Le sens du courant induit créé par la tension induite (circuit fermé) est défini par la règle de la main droite (figure 3.15).

Une tension induite U_i est créée aux bornes d'un conducteur ou d'une bobine

- lorsque le conducteur ou la bobine se déplace dans un champ magnétique ;
- lorsque le conducteur (ou la bobine) est traversé par un flux variable.

Si on a une bobine à N spires :

$$U_i = + N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

La tension totale aux bornes d'une bobine de résistance R est alors égale à la somme de la tension induite et de la chute de tension due à la résistance (loi d'Ohm) :

$$u_{\text{tot}} = -R \cdot i + N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

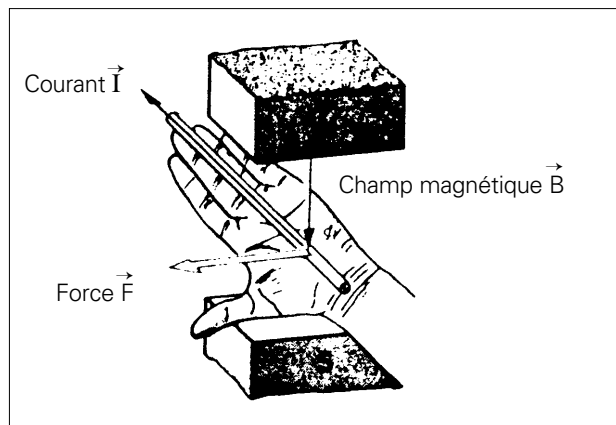


Figure 3.13: Sens de la force courant-champ

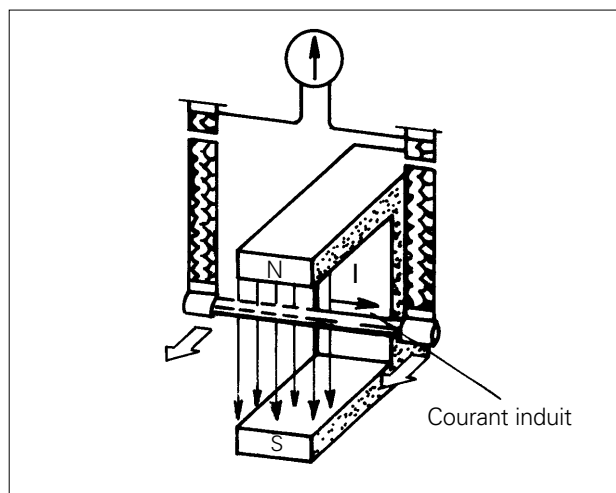


Figure 3.14: Tension induite

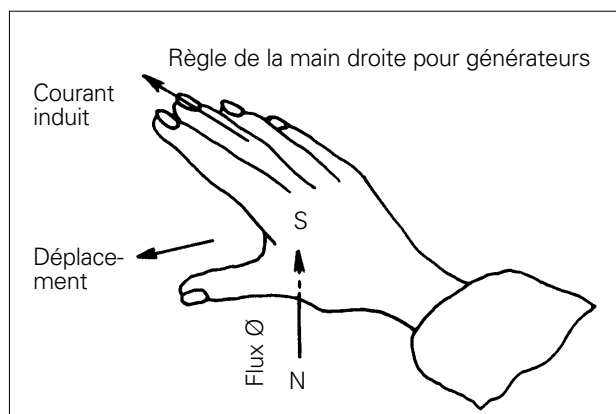


Figure 3.15: Sens du courant de mouvement (règle de la main droite)

3.2.6 Tension induite de mouvement ou de rotation Génératrice élémentaire

Une tension induite alternative peut être générée en faisant tourner une spire (ou une bobine à N spires) dans un champ magnétique créé par un aimant permanent ou par un électroaimant.

On obtient ainsi une génératrice élémentaire à courant alternatif (figure 3.16), où la rotation provoque la variation du flux embrassé par la spire ou la bobine.

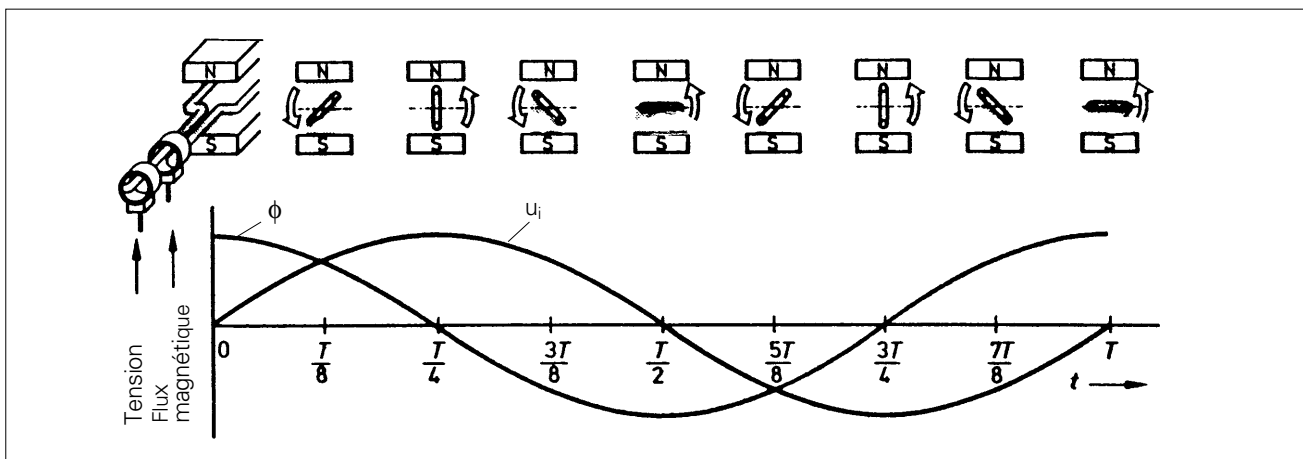


Figure 3.16: Génératrice élémentaire

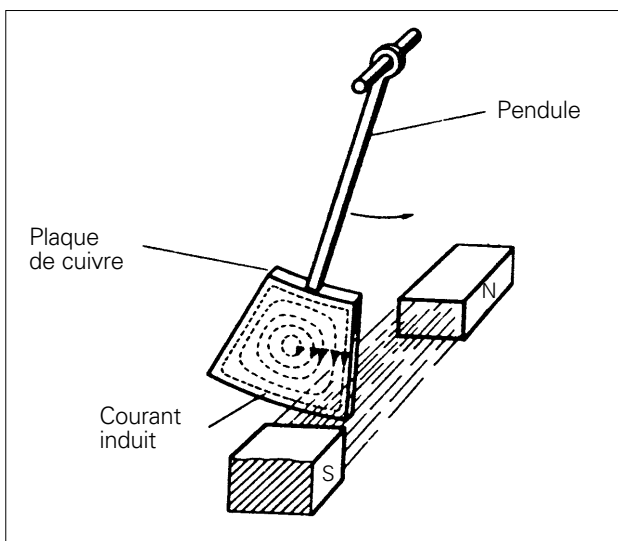


Figure 3.17: Courants de Foucault

3.2.7 Courants de Foucault

Une pièce massive, avec un matériau conducteur, qui est déplacée dans un champ magnétique est le siège de courants induits (fermés sur eux-mêmes) qu'on appelle **courants de Foucault** (figure 3.17).

Pour limiter ces courants dans les circuits magnétiques, il faut lameller le fer en faisant des paquets de tôles minces isolées entre elles comme indiqué sur la figure 3.18

3.3 Machine synchrone

3.3.1 Généralités

Dans le fonctionnement en moteur, la fréquence de rotation de la machine est rigoureusement imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente le stator. De même en générateur, la fréquence électrique sera imposée par la vitesse de rotation. Cette propriété justifie la dénomination de **synchrone**.

La fréquence f délivrée par le générateur synchrone est directement proportionnelle à la vitesse de rotation n de son rotor :

$$f = p \cdot n$$

où p , le nombre de paires de pôles, est le facteur de proportionnalité.

Quelques valeurs pour 50 Hz :

Nombre de pôles $2 p$	Vitesse n (t/min)
2	3000
4	1500
6	1000
8	750
10	600
12	500

Tableau 3.1

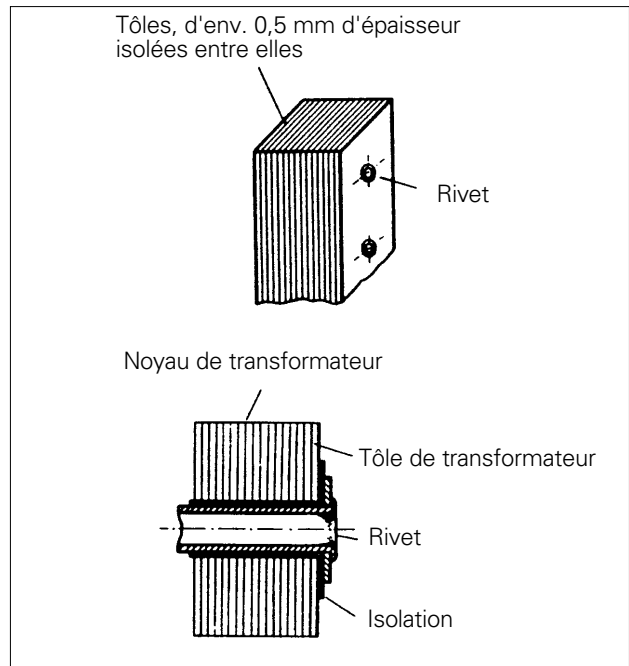


Figure 3.18: Tôles

3.3.2 Principe

Dans une machine synchrone (figure 3.19), on distingue :

- l'inducteur (rotor) parcouru par un courant continu ou parfois constitué d'aimants permanents ;
- l'induit (stator) parcouru par des courants alternatifs en général triphasés.

Le stator triphasé est composé de trois groupes de conducteurs, logés dans les encoches du stator. Ces derniers sont associés pour former trois enroulements identiques (un par phase) et décalés d'un angle électrique de 120° les uns par rapport aux autres. Ils sont parcourus par **trois courants qui forment un système triphasé** et créent un **champ tournant** excitateur.

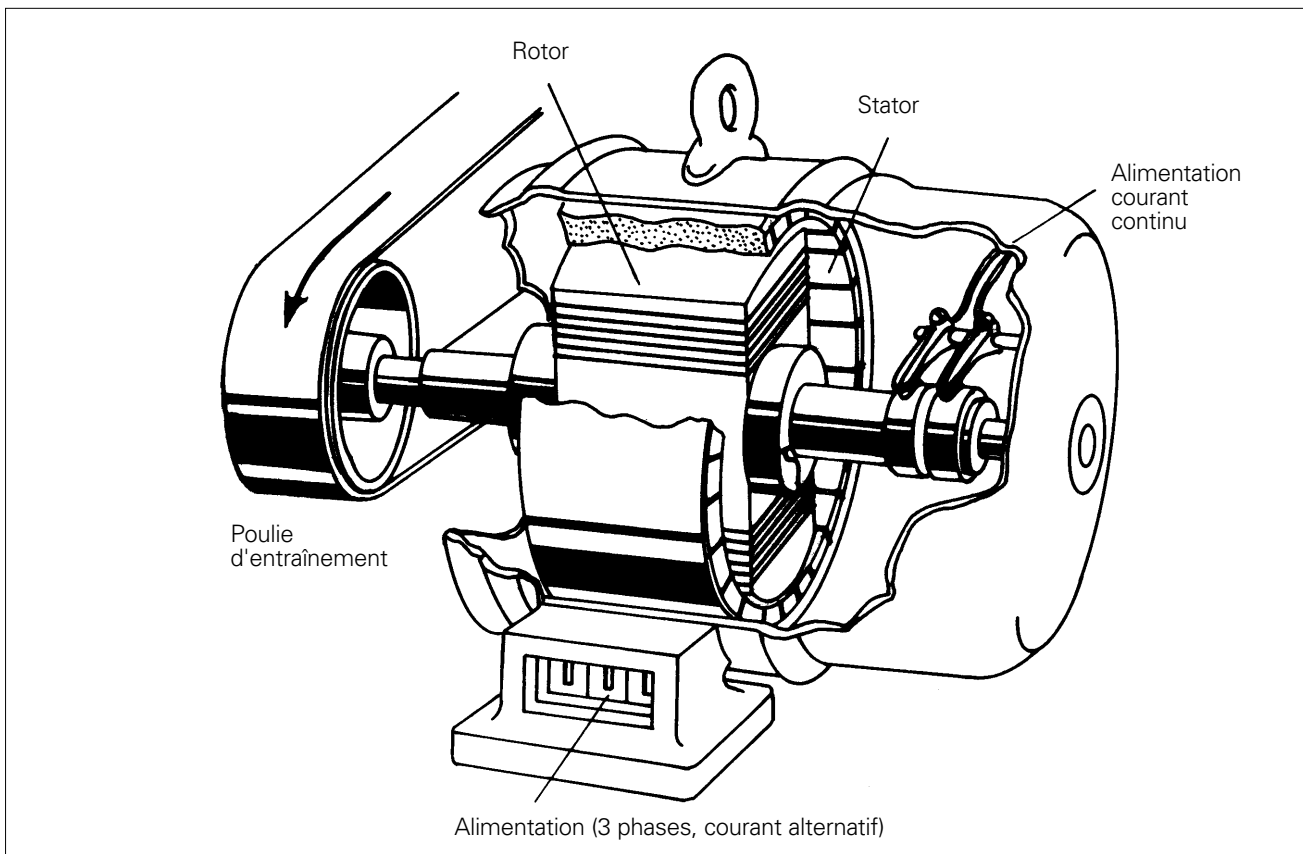


Figure 3.19: Représentation schématique d'une machine synchrone

Dans une machine synchrone le stator est réalisé selon le principe de la figure 3.20 pour une machine à 2 pôles ou de la figure 3.21 pour une machine à 4 pôles.

Un schéma simplifié du bobinage d'une machine à 4 pôles est proposé à la figure 3.22. Les indices représentent les phases, les couples de lettres (a-b et c-d) les paires de pôles.

Les conducteurs créent un champ tournant à répartition sinusoïdale, comportant $2p$ pôles, dont la vitesse Ω_s est liée à la **pulsation électrique** ω des courants d'alimentation et au nombre p de paires de pôles déterminé par le bobinage du stator.

$$\Omega_s = \omega/p = 2 \cdot \pi \cdot n_s$$

Ω_s : vitesse en rad/s
 n_s : vitesse en tour/s

Le rôle du rotor est de créer le champ magnétique tournant nécessaire à engendrer la tension induite alternative aux bornes du stator.

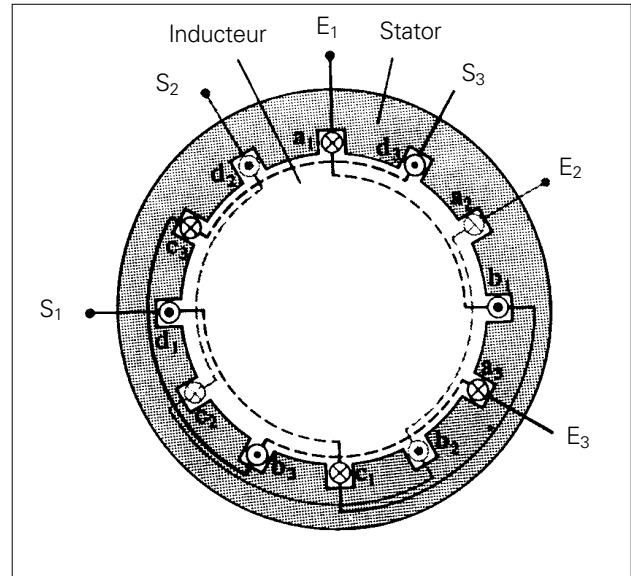


Figure 3.21: Stator triphasé 4 pôles

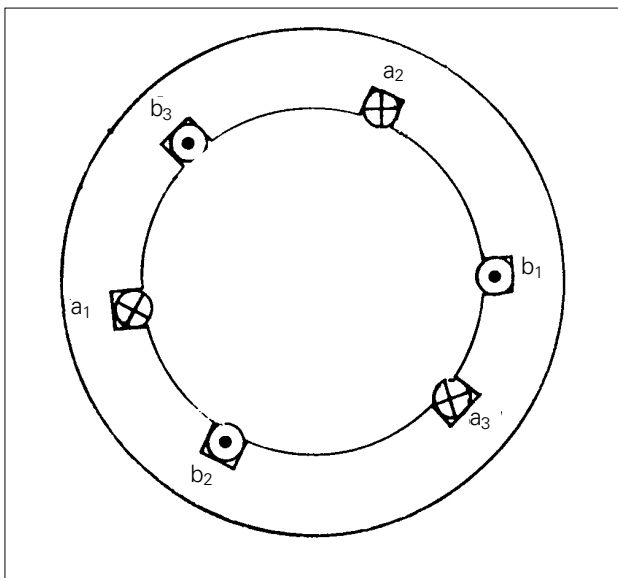


Figure 3.20: Stator triphasé 2 pôles

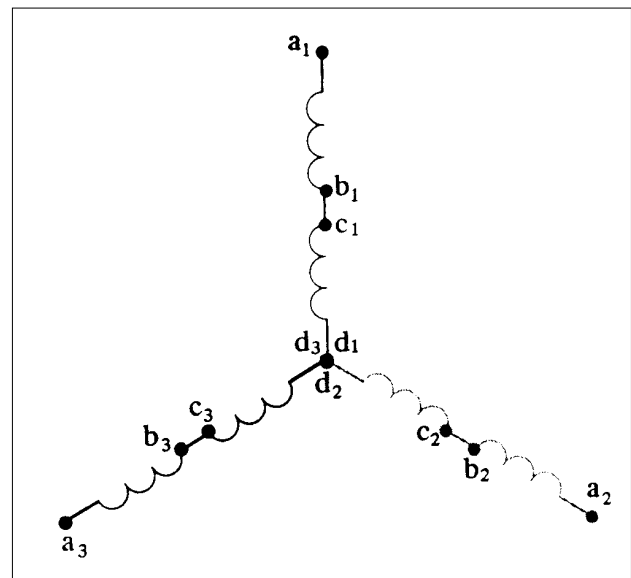


Figure 3.22: Représentation simplifiée d'un bobinage quadripolaire

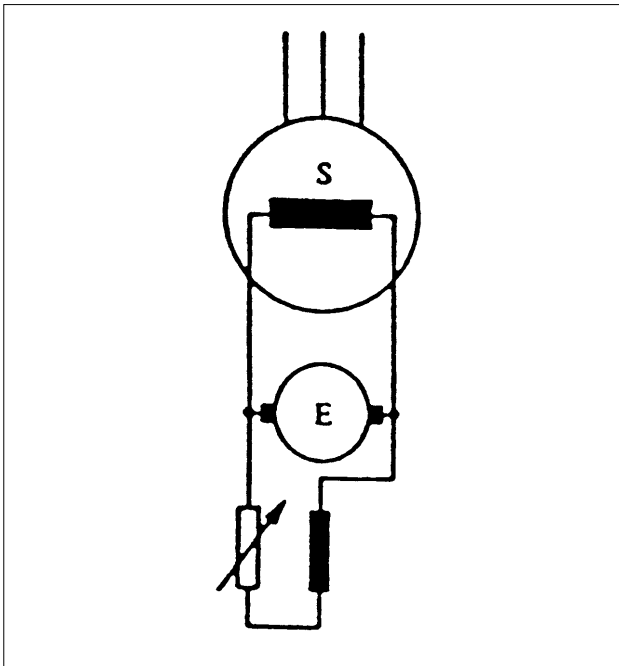


Figure 3.23: Excitatrice auxiliaire

Le rotor, d'un point de vue magnétique est donc un aimant qui peut être de 2 types :

- **le rotor à aimants permanents**, dans lequel le flux créé est constant. La tension induite ne dépend donc que de la fréquence (voir § 3.3.5);
- **le rotor avec bobinage d'excitation**, dans lequel le flux varie avec le courant continu injecté dans la bobine (courant d'excitation).

D'un point de vue constructif, on considère :

- **le rotor à pôles lisses** où l'entrefer est constant ;
- **le rotor à pôles saillants**.

Pour des raisons économiques, les machines de petite puissance à pôles saillants sont rares. Les constructeurs utilisent plutôt des tôles de rotors de moteurs asynchrones. Le bobinage est monté dans les encoches de manière à avoir le nombre de pôles désiré.

Les différents types d'excitation avec bobinage sont représentés aux figures 3.23, 3.24, 3.25.

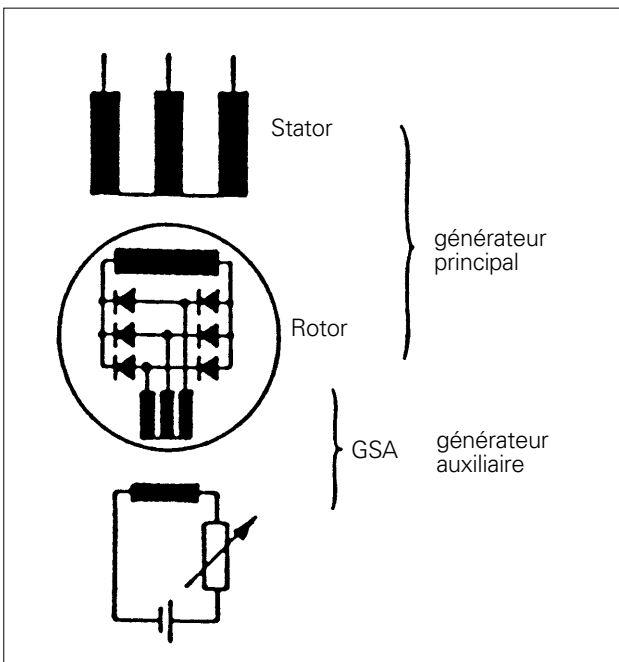


Figure 3.24: Excitation à diodes tournantes

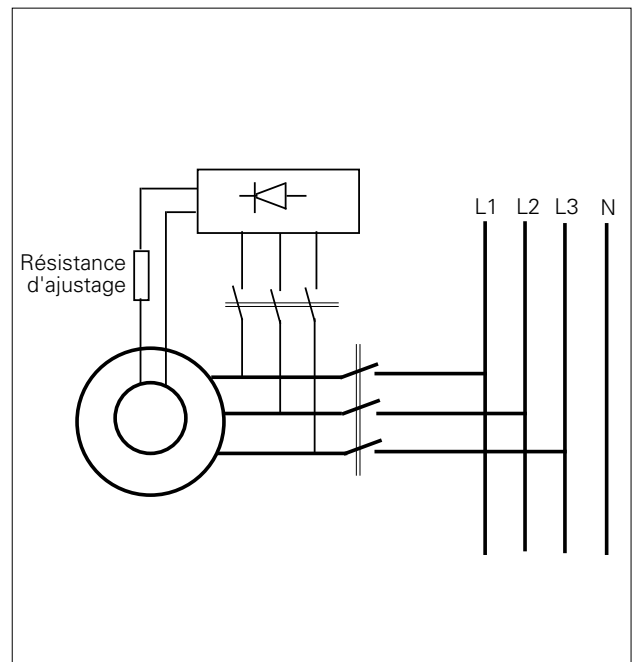


Figure 3.25: Excitation en sous-tirage

3.3.3 Bilan des puissances – Rendement

Voir bilan figure 3.26.

La puissance $P_{abs.}$ absorbée par le générateur synchrone est la puissance mécanique $P_{mec.}$ à l'arbre
 $P_{abs.} = P_{mec.}$

La puissance active P_{utile} fournie au réseau, ou aux consommateurs, s'exprime en fonction de la tension aux bornes d'une phase et du courant dans chaque phase par :

$$P_{utile} = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos \varphi$$

et en fonction de la tension composée et du courant de ligne :

$$P_{utile} = \sqrt{3} \cdot U_{ligne} \cdot I_{ligne} \cdot \cos \varphi$$

La différence entre les puissances absorbée et fournie représente les pertes dans le générateur synchrone :

$$P_{abs} - P_{utile} = \Sigma \text{ PERTES}$$

Les différentes pertes sont :

- les pertes par frottement et ventilation ;
- les pertes dans le circuit magnétique du stator, ou pertes fer ;
- les pertes cuivre dues au passage du courant dans les 3 bobinages du stator ;
- les pertes par effet joule dans le bobinage d'excitation.

Le rendement est le rapport entre les puissances fournie et absorbée :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{absorbée}} = \frac{P_{utile}}{P_{utile} + \Sigma \text{ Pertes}}$$

3.3.4 Symbole

Le symbole normalisé d'une machine synchrone est représenté à la figure 3.27.

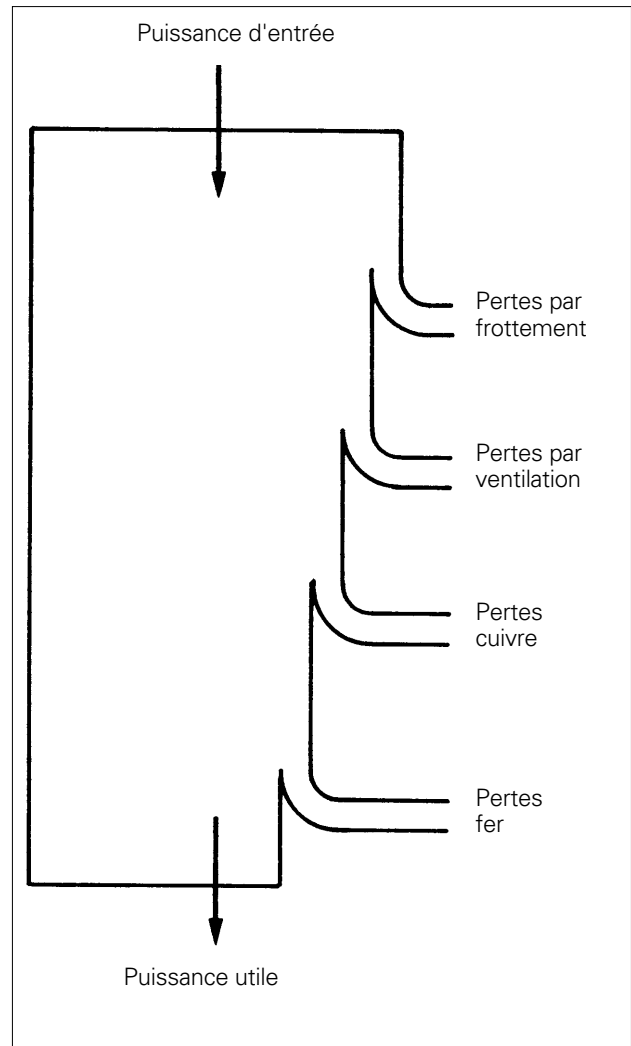


Figure 3.26: Bilan de puissance

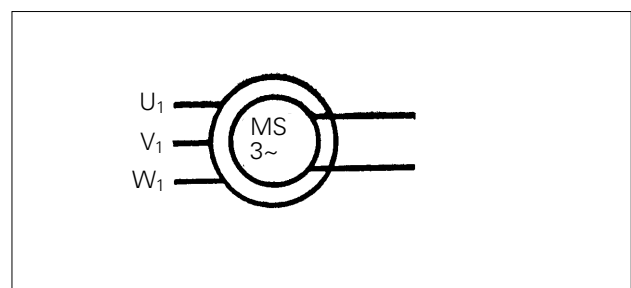


Figure 3.27: Symbole de la machine asynchrone

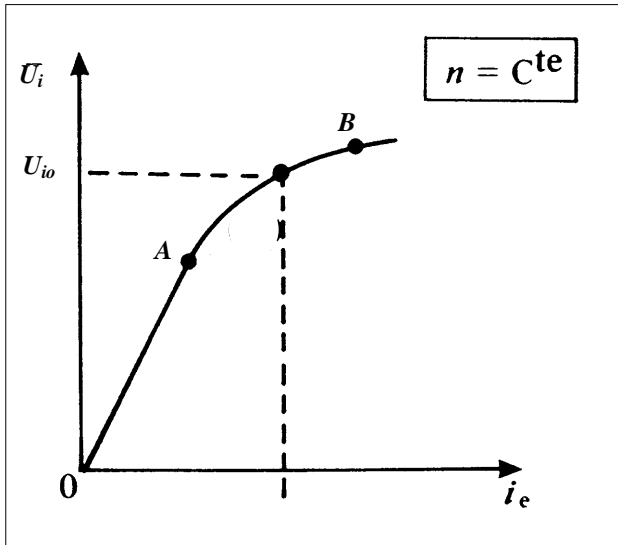


Figure 3.28: Caractéristique à vide. Le point de fonctionnement se trouve en général dans la zone entre les points A et B

3.3.5 Tension induite dans les machines synchrones

La tension induite U_i aux bornes d'une phase est proportionnelle :

- à la fréquence f , c'est-à-dire à la vitesse ;
- au flux magnétique Φ créé par le champ d'excitation, qui est lui-même généré par le courant d'excitation i_{exc} ;
- au nombre de spires N en série par phase.

$$U_i = K \cdot N \cdot f \cdot \Phi \quad (V)$$

La formule précédente donne la valeur efficace de la tension induite dans chacune des phases.

Lorsque le rotor tourne à vitesse constante, elle peut s'écrire :

$$U_i = K' \cdot i_{exc} \quad (V)$$

La variation de la tension induite U_i en fonction du courant d'excitation i_{exc} est appelée caractéristique à vide. Elle est représentée à la figure 3.28.

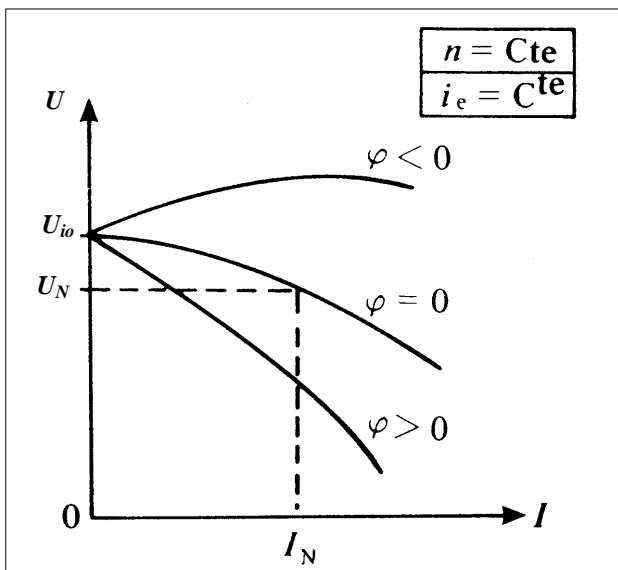


Figure 3.29: Caractéristiques externes. Les caractéristiques sont tracées pour 3 valeurs de φ

3.3.6 Caractéristiques en générateur

Si l'alternateur est entraîné à vitesse constante et qu'il alimente une charge en îlot, les caractéristiques obtenues montrent que la tension (U) varie beaucoup en fonction de l'intensité du courant débité et en fonction du déphasage imposé par la charge. Ces caractéristiques sont appelées caractéristiques externes et sont représentées à la figure 3.29.

Ainsi, **pour avoir une tension fixe**, il faudra régler le courant d'excitation du générateur.

Pour **adapter la fréquence**, il faudra régler le débit d'eau dans la turbine.

Ces fonctions sont remplies par un organe de régulation (voir chapitres 4 et 5).

3.3.7 Exercices

1. La tension entre phases d'un alternateur triphasé couplé en étoile est égale à 380 V. Il débite un courant d'intensité efficace de 6.0 A dans une charge triphasée dont le facteur de puissance est de 0.85.

- Quelles sont les puissances active, réactive, apparente de la charge?
- Sachant que le rendement de l'alternateur est de 89.5%, calculer la puissance mécanique qu'il absorbe.
- Dans ces conditions de fonctionnement, déterminer les pertes de l'alternateur.

Réponse:

3357 W, 2080 var, 3949 VA, 3751 W, 394 W

2. Un alternateur triphasé 4 pôles – 380 V (étoile) – 50Hz, alimente un moteur asynchrone triphasé qui absorbe une puissance de 3.0 kW. Le facteur de puissance du moteur est égal à 0.9, son stator est couplé en triangle.

L'alternateur absorbe une puissance mécanique de 3.4 kW.

- Calculer l'intensité efficace I du courant de ligne?
- Déterminer le rendement de l'alternateur pour ces conditions de fonctionnement?

Réponse: 5 A, 88.24%.

3. A vide, un alternateur à aimants permanents fournit une tension induite de phase de valeur efficace 220 V lorsque le rotor tourne à 1500 t/min.

Quelle est la tension induite lorsque le rotor tourne à 2000 t/min?

Réponse: 293.3 V

3.4 Machine asynchrone triphasée

3.4.1 Généralités

La machine asynchrone, appelée aussi machine à induction, peut, comme toutes les machines électriques, fonctionner aussi bien en génératrice qu'en moteur. C'est toutefois le plus répandu des moteurs électriques, parce qu'il est simple, de construction robuste, et d'un prix de revient relativement modique. Ces avantages sont surtout dus au fait que le rotor n'est branché sur aucune source extérieure de tension, sauf utilisation particulière avec rotor bobiné.

Il doit son nom de moteur à induction au fait que le champ tournant du stator induit des courants alternatifs dans le circuit rotorique.

3.4.2 Principe

La machine asynchrone est constituée d'un élément fixe circulaire appelé stator, dans lequel tourne un élément mobile cylindrique appelé rotor (figure 3.30). Les deux éléments sont faits de tôles magnétiques empilées, de faible épaisseur (0.2 mm, 0.5 mm), dans le but de réduire les pertes fer dues à la présence de champs magnétiques alternatifs.

- **Le stator** d'une machine asynchrone est identique au stator d'une machine synchrone (chap. 3.3.2).
- **Le rotor** comporte un bobinage en court-circuit. Il peut être constitué aussi d'un cylindre massif en matériau conducteur. Dans les deux cas, le bobinage rotorique forme un circuit fermé sur lui-même.

Le rotor à cage d'écurieil est le plus couramment utilisé. Il se compose de barres de cuivre ou d'aluminium placées dans des encoches et reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de même matière. Les tensions induites étant généralement faibles, les barres ne sont souvent pas isolées du corps rotorique (tôles).

Le rotor bobiné est constitué de bobines de fil isolé placées dans des encoches et reliées, comme le bobinage statorique, de façon à réaliser un

enroulement triphasé. En fonctionnement normal, les trois phases sont court-circuitées entre elles. Sous l'action du champ tournant, des tensions sont induites dans les conducteurs rotoriques. Ces derniers sont alors parcourus par des courants induits (*courants de Foucault*) qui créent le champ tournant induit.

L'interaction du champ exciteur et du champ induit crée un couple moteur responsable de la rotation du moteur.

D'après la *loi de Lenz*, le système réagit en s'opposant à la cause du phénomène d'induction magnétique, c'est-à-dire au déplacement relatif du champ tournant par rapport aux conducteurs rotoriques.

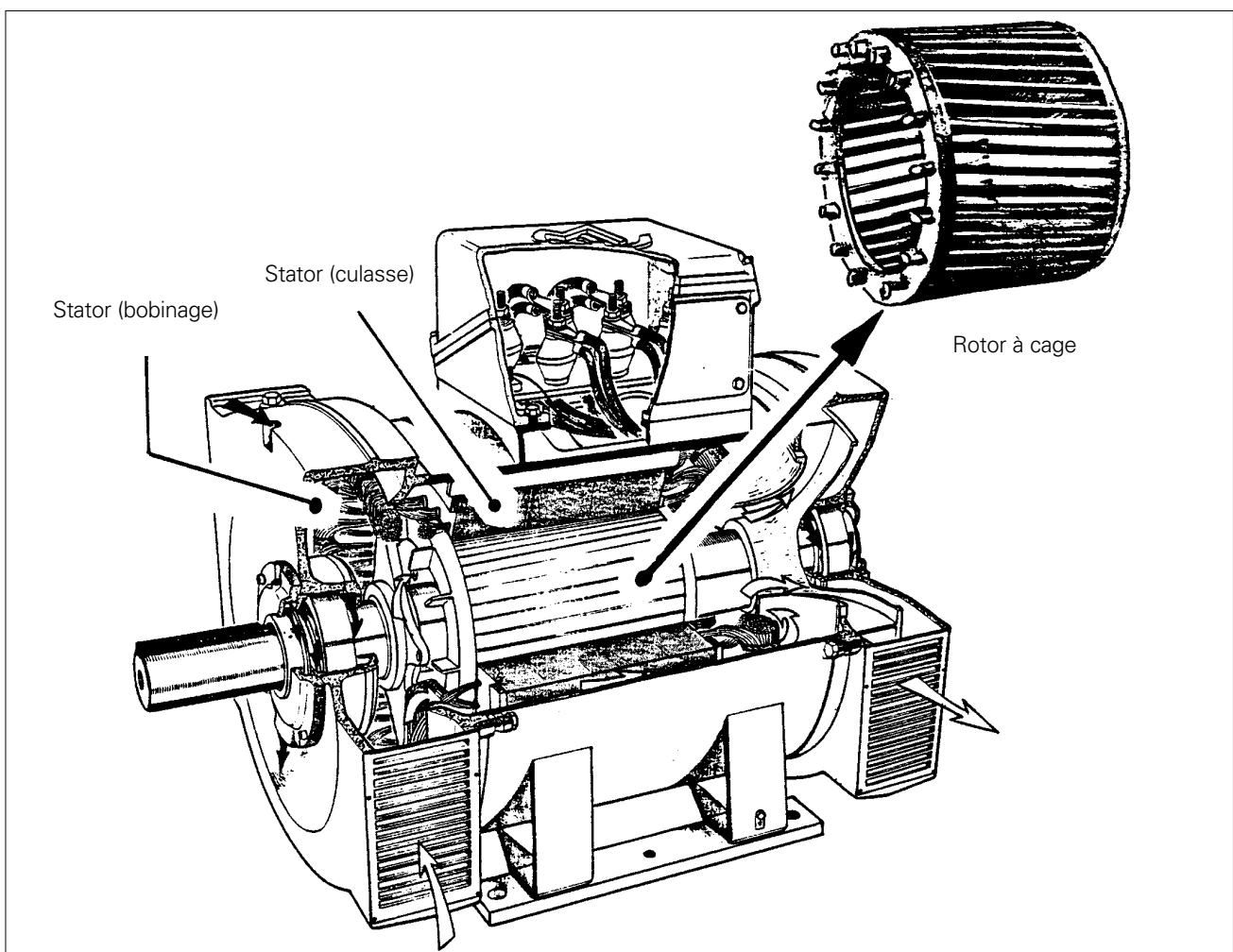


Figure 3.30: Machine asynchrone

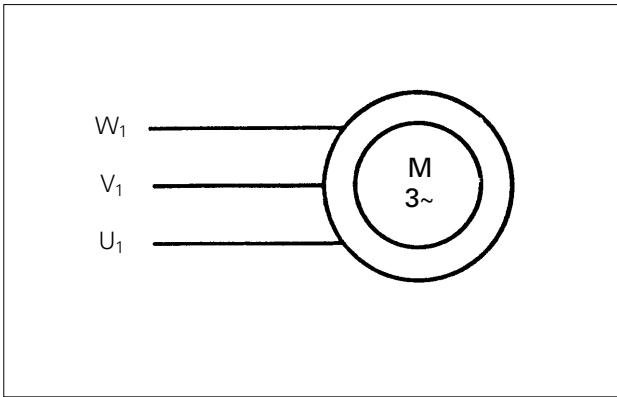


Figure 3.31: Symbole d'une machine asynchrone

3.4.3 Symbole

Le symbole normalisé d'un moteur asynchrone est donné à la figure 3.31.

3.4.4 Couple électromagnétique

Dans une machine asynchrone (figure 3.32), un champ tourne dans l'entrefer à une vitesse angulaire Ω_s . En régime moteur le rotor de la machine tourne à la vitesse angulaire Ω inférieure à Ω_s . Les conducteurs du rotor sont alors soumis à un champ magnétique variable qui tourne par rapport à eux-mêmes à la vitesse $(\Omega_s - \Omega)$. Il en résulte une tension induite dans les conducteurs. Ceux-ci étant en court-circuit, des courants induits y circuleront.

Si le moteur comporte p paires de pôles, la pulsation des courants rotoriques est :

$$\omega_r = p \cdot (\Omega_s - \Omega) = p \cdot s \cdot \Omega_s = s \cdot \omega$$

s est appelé glissement; il représente l'écart relatif de vitesse entre le champ tournant et le rotor, rapporté à la vitesse du champ tournant. C'est un nombre sans dimension que l'on exprime généralement en %.

$$s = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s = (n_s - n) / n_s$$

Si la vitesse Ω était égale à Ω_s , il n'y aurait plus de déplacement relatif du champ tournant par rapport au conducteur du rotor, donc pas d'actions électromagnétiques et pas de couple moteur.

En moteur, le glissement est positif $n < n_s$. Le rotor est en retard par rapport au champ tournant, il fournit un couple.

En générateur, le glissement est négatif $n > n_s$. Le rotor est en avance par rapport au champ tournant statorique; on doit fournir un couple à l'arbre par la machine d'entraînement (turbine).

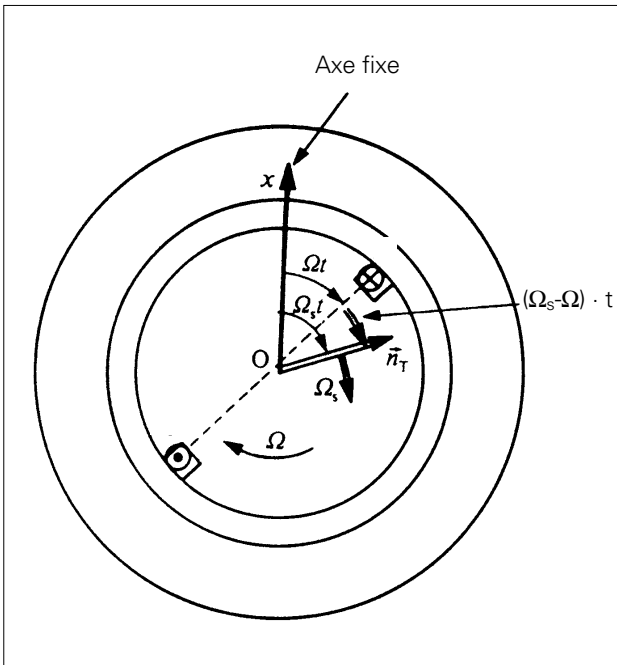


Figure 3.32: Champ dans l'entrefer
Le champ résultant dans l'entrefer est à répartition sinusoïdale. Il est figuré ici par la direction de son axe définie par le vecteur unitaire (\vec{n}_T) . Ce champ tourne à la vitesse angulaire Ω_s . Il provient de la composition du champ dû au stator qui tourne à la vitesse Ω_s et du champ dû aux courants rotoriques dont la vitesse angulaire vaut : $\Omega + (\Omega_s - \Omega) = \Omega_s$

Les différents conducteurs du rotor sont soumis à des forces de Laplace (figure 3.33) qui résultent de l'interaction du champ tournant avec les courants induits.

L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant (M_{em}). Il développe une puissance électromagnétique égale à $M_{em} \cdot \Omega_s$.

3.4.5 Puissances et couple

La puissance active (P) absorbée par un moteur ou fournie par une génératrice peut s'exprimer par :

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

U = tension entre phases du réseau
 I = courant dans la ligne
 φ = déphasage entre la tension de phase et le courant de phase

La puissance mécanique utile P_u à l'arbre d'un moteur est fonction du couple utile M_u et de la vitesse angulaire Ω du rotor.

$$P_u = M_u \cdot \Omega$$

où $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ [rad./s]

Le rapport entre la puissance absorbée et la puissance utile donne le rendement η de la machine :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

La différence de ces deux puissances constitue la somme des pertes dissipées dans la machine :

$$P_a - P_u = \Sigma \text{Pertes}$$

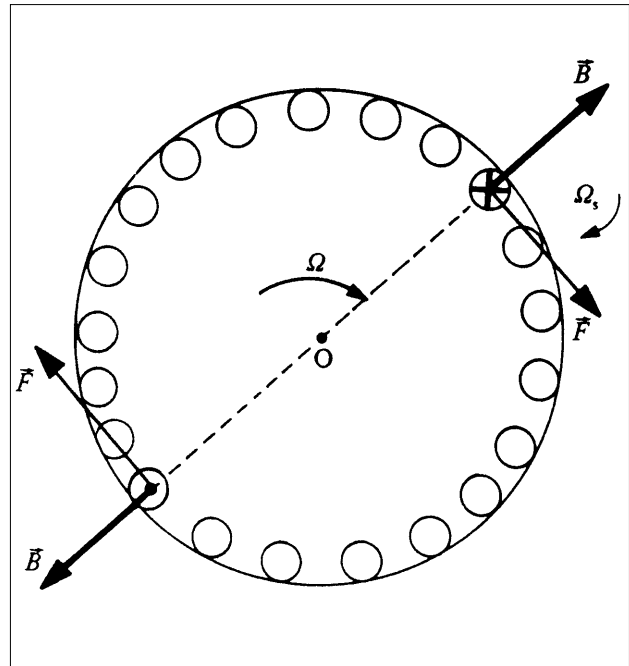


Figure 3.33: Forces de Laplace

Les spires d'un rotor à cage sont balayées par un champ tournant. A chaque instant l'axe de la spire où l'intensité est maximale coïncide avec l'axe du champ rotorique qui tourne à la vitesse Ω_s . Celle-ci est donc à la fois la vitesse de rotation de la distribution des courants induits et celle de l'ensemble des forces de Laplace qui glissent par rapport au rotor à la vitesse $\Omega_s - \Omega$.

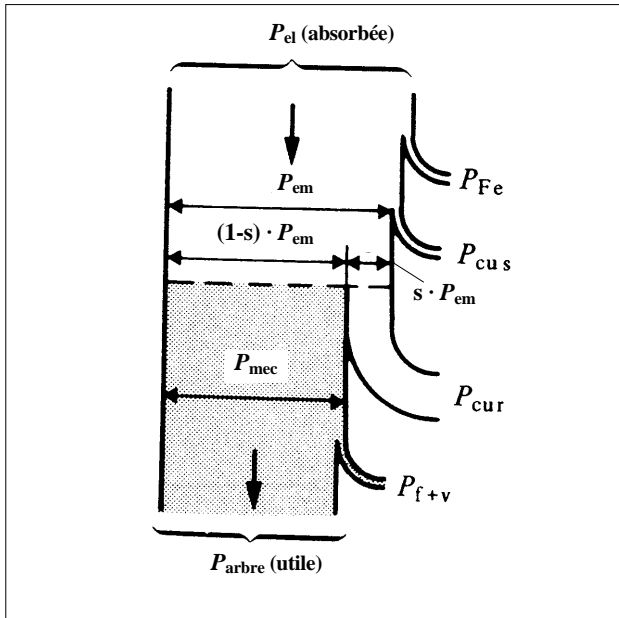


Figure 3.34: Bilan de puissance en moteur

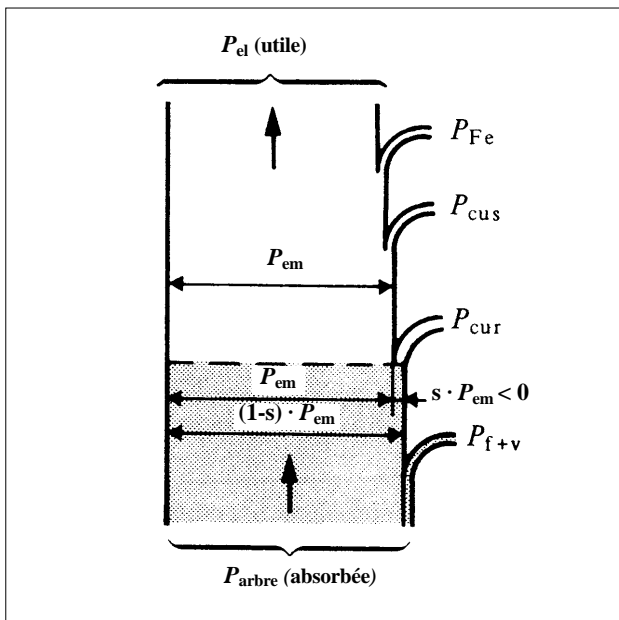


Figure 3.35: Bilan de puissance en génératrice

- P_{Fe} = pertes fer statoriques
- P_{cus} = pertes ohmiques statoriques
- P_{cur} = pertes ohmiques rotoriques
- P_{f+v} = pertes mécaniques

Ces pertes sont de quatre ordres :

- mécaniques: P_{f+v}
dues aux frottements et à la ventilation
- fer: P_{fer}
par hystérèse et courants de Foucault dues aux champs magnétiques alternatifs. Au rotor, elles sont négligeables du fait de la faible fréquence du champ.
- par effet Joule
 - au stator:

$$P_{cus} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$$

 où R_s est la résistance statorique
 - au rotor:

$$P_{cur} = Z_R \cdot R_r \cdot I_r^2$$

 où R_r est la résistance d'une barre rotorique; Z_r est le nombre de barres rotoriques.
- supplémentaires: P_{sup}
dues aux harmoniques supérieurs du champ magnétique et à la présence des encoches; elles sont estimées à environ 0,5% de la puissance utile.

Le bilan énergétique, ou flux de puissance, permet d'analyser dans le détail la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique ou vice versa (figures 3.34 et 3.35).

En moteur, la puissance transmise au rotor (P_{em} ou P_{δ}) est la puissance absorbée (P_a) diminuée des pertes fer, des pertes Joule au stator et des pertes supplémentaires :

$$P_{em} = P_a - P_{fer} - P_{cus} - P_{sup}$$

P_{em} est appelée puissance électromagnétique (ou puissance d'entrefer). Elle est transmise au rotor par le couple électromagnétique M_{em} développé grâce au champ tournant.

$$P_{em} = M_{em} \cdot \Omega_s$$

$\Omega_s = 2 \pi n_s$ étant la vitesse angulaire du champ tournant [rad/s].

Le couple électromagnétique est le même sur le rotor et sur le stator. Mais la vitesse du rotor Ω est plus faible que celle du champ tournant Ω_s :

$$\Omega = (1 - s) \cdot \Omega_s$$

La puissance se transmet au rotor avec un couple constant, mais avec une perte de vitesse. La puissance mécanique est donc plus faible que la puissance électromagnétique :

$$P_{\text{mec}} = M_{\text{em}} \cdot \Omega$$

La différence ($P_{\text{em}} - P_{\text{mec}}$) est perdue par l'effet Joule dans le rotor :

$$P_{\text{cur}} = P_{\text{em}} - P_{\text{mec}} = M_{\text{em}} \cdot (\Omega_s - \Omega) = M_{\text{em}} \cdot \Omega_s \cdot s$$

$$P_{\text{cur}} = s \cdot P_{\text{em}} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2$$

D'où l'on tire :

$$P_{\text{mec}} = (1 - s) \cdot P_{\text{em}}$$

et

$$P_{\text{em}} = \frac{3 \cdot R_r \cdot I_r^2}{s}$$

La puissance utile est obtenue en enlevant de la puissance mécanique les pertes mécaniques P_{f+v} .

$$P_u = P_{\text{mec}} - P_{f+v}$$

Le couple utile a pour expression :

$$M_u = \frac{P_u}{\Omega} = M_{\text{em}} - M_{f+v}$$

où

$$M_{f+v} = \frac{P_{f+v}}{\Omega}$$

Remarque : le couple électromagnétique est proportionnel aux pertes Joule dans le rotor :

$$M_{\text{em}} = \frac{P_{\text{em}}}{\Omega_s} = \frac{3 \cdot R_r \cdot I_r^2}{s \cdot \Omega_s}$$

Au démarrage, les pertes mécaniques P_{f+v} sont nulles et le glissement est égal à l'unité.

Donc :

$$M_{\text{ed}} = M_{\text{ud}} = \frac{3 \cdot R_r \cdot I_r^2}{\Omega_s}$$

3.4.6 Caractéristiques

La machine asynchrone est caractérisée par une courbe de couple représentée à la figure 3.36.

Il est aussi intéressant de représenter diverses caractéristiques du moteur en fonction de sa puissance mécanique, tels que le rendement (η), le $\cos \varphi$, le courant (I), le glissement (s), le couple utile (M_u) (figure 3.37).

Si la machine travaille en générateur, il est préférable de représenter ces courbes en fonction de la puissance utile, c'est-à-dire de la puissance électrique fournie aux consommateurs (figure 3.38).

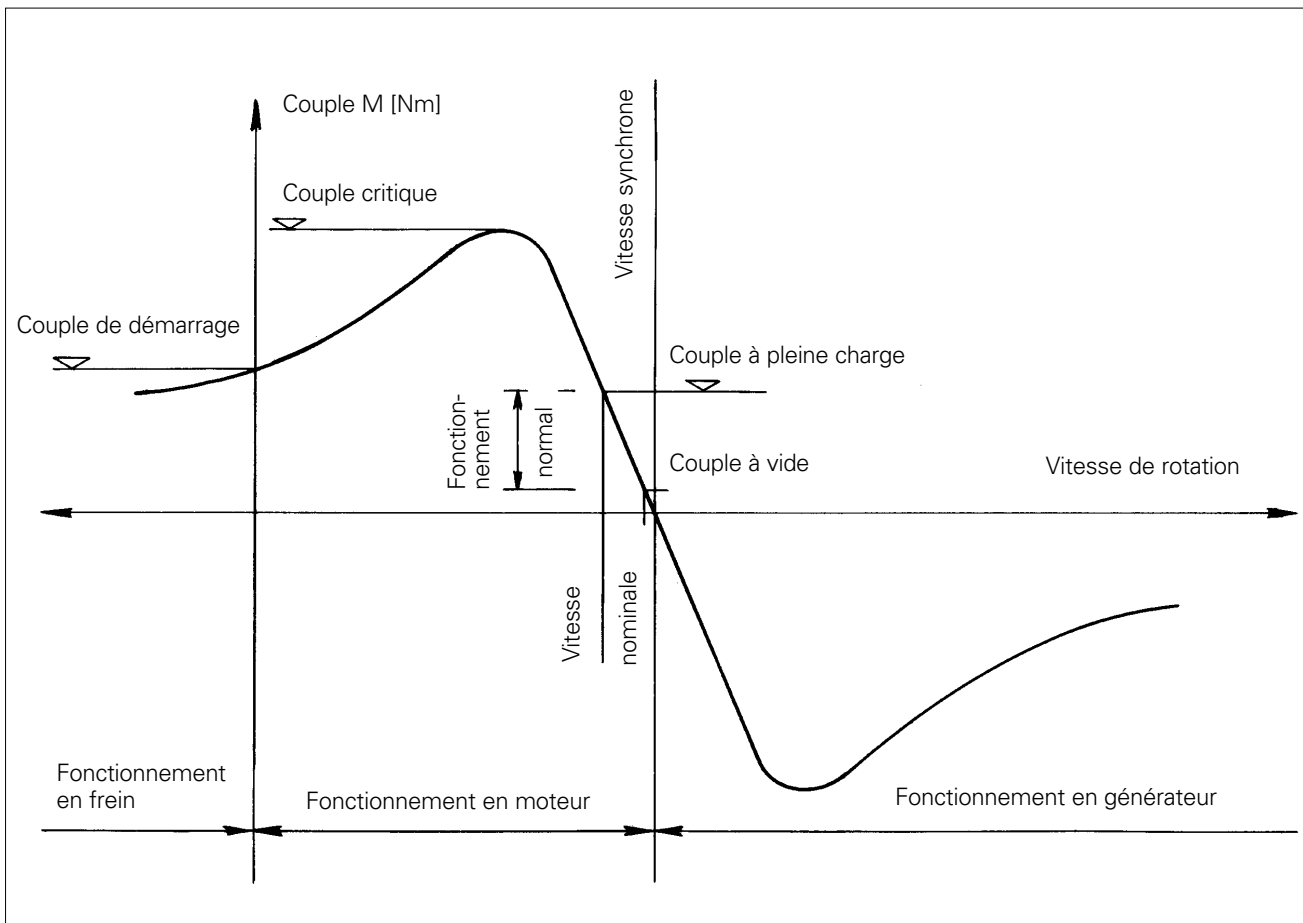


Figure 3.36: Courbe de couple en fonction de la vitesse ou du glissement
En fonctionnement normal, le moteur travaille dans la partie linéaire de la courbe

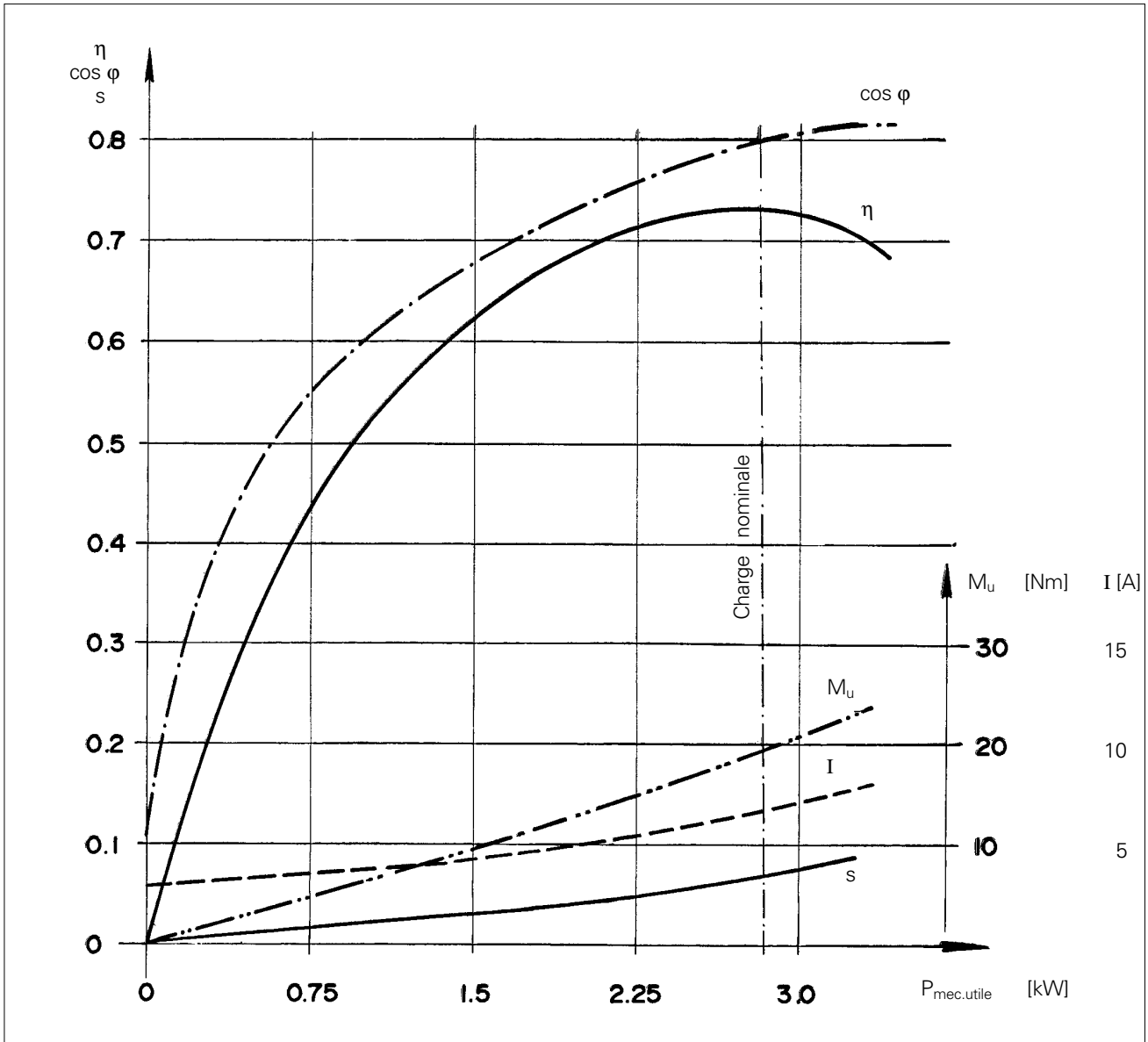


Figure 3.37: Caractéristiques d'un moteur asynchrone
 2,8 kW – 3 x 380 VΔ – 50 Hz – 1425 t/min

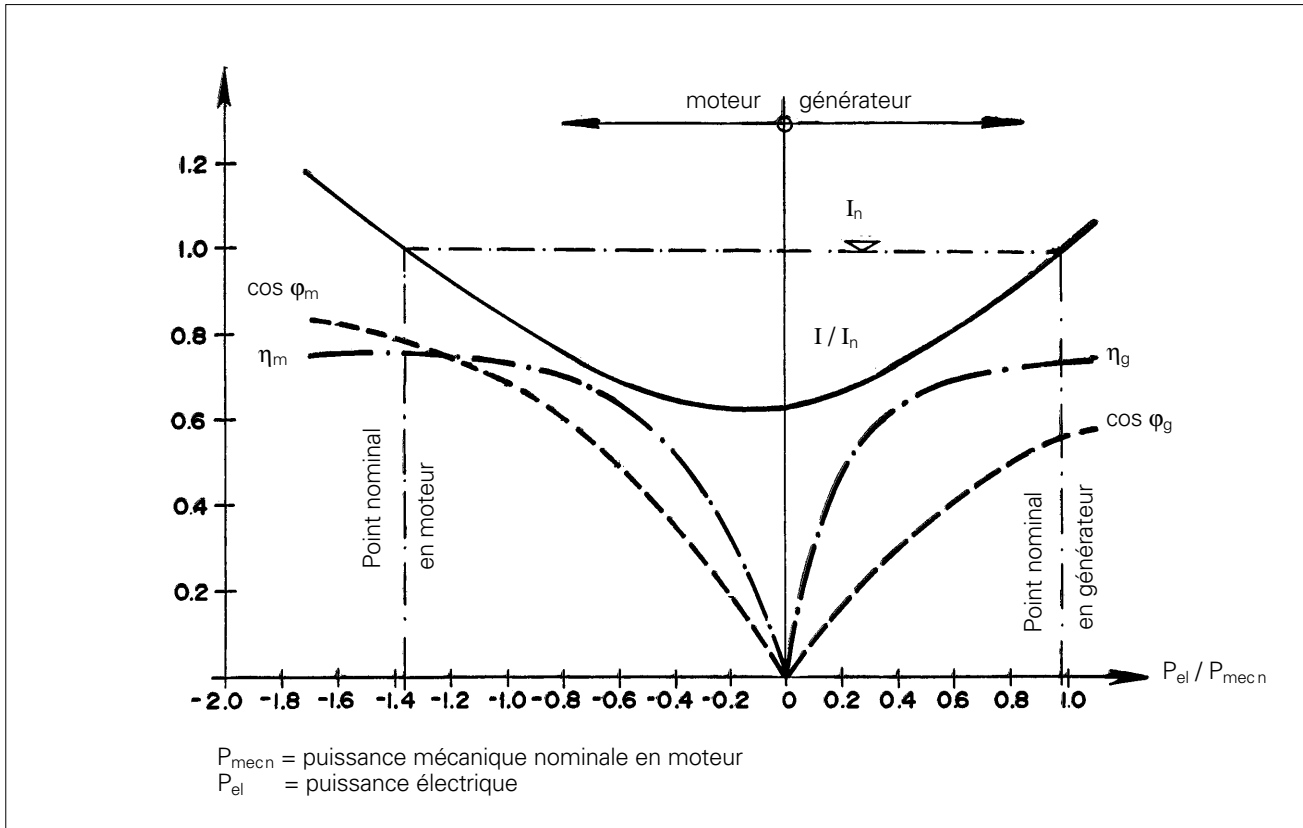


Figure 3.38: Caractéristiques d'une machine asynchrone en moteur et en générateur

3.4.7 Fonctionnement en génératrice

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, la machine asynchrone peut fonctionner en génératrice sous certaines conditions :

- elle doit être entraînée (turbine) à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone ; ainsi le glissement est négatif. Pour un fonctionnement nominal en génératrice, la puissance électrique fournie correspondra environ à la puissance mécanique nominale en moteur. Le glissement sera proche, au signe près, du glissement nominal pouvant être déterminé grâce à la vitesse indiquée sur la plaque signalétique (chap. 4.1) ;
- la machine asynchrone consomme toujours de la puissance réactive, aussi bien en moteur qu'en générateur du fait que l'enroulement statorique est toujours l'enroulement exciteur. Cette puissance réactive sera fournie par le réseau ou par une batterie de condensateurs (chap. 4.2 et 4.3).

En génératrice, le rendement est défini par :

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mec}}$$

En régime générateur, la puissance réactive est supérieure à celle consommée. D'où :

$$\cos \varphi_{Gen.} < \cos \varphi_{mot.}$$

Ainsi, le rendement sera plus faible en génératrice qu'en moteur.

3.4.8 Exercices

1. Un moteur asynchrone triphasé à cage (220 V/380 V, 50 Hz) est alimenté par une ligne triphasée 380 V, 50 Hz. Quel doit être le couplage des enroulements du stator ?
Réponse: étoile.
2. Un moteur asynchrone présente les caractéristiques suivantes :
5 kW, 220 V/380 V, 50 Hz, 732 t/min.
Quel est le nombre de pôles du stator ?
Réponse: 8 pôles.
3. Un moteur asynchrone triphasé dont les enroulements triphasés sont couplés en triangle est alimenté par le réseau triphasé 400 V, 50 Hz. Chaque phase du stator a une résistance $R_s = 0,40 \Omega$ à 75°C. L'intensité efficace dans un fil de la ligne est égale à 11,2 A.
Déterminer les pertes par effet Joule au stator ?
Réponse: 50 W.
4. Un moteur asynchrone triphasé absorbe une puissance électrique $P_a = 9.0$ kW.
Les pertes fer et les pertes Joule au stator sont égales à 500 W. Le glissement est de 2.5%.
Déterminer les pertes par effet Joule dans le rotor ?
Réponse: 213 W.
5. Les essais en charge d'un moteur asynchrone triphasé 6 pôles dont le stator est couplé en triangle ont donné les résultats suivants :
 $U = 400$ V (entre phases),
 $I = 24$ A, $P_a = 14.8$ kW,
 $n = 970$ t/min.
– essai à vide :
 $U = 400$ V,
 $I_0 = 11$ A, $P_a = 360$ W.

– mesure de la résistance statorique :
 $R_s = 0.50 \Omega$ à 20°C

A partir de ces essais déterminer :

- a) le glissement s ,
- b) le $\cos \varphi$,
- c) la somme des pertes fer du stator et des pertes mécaniques,
- d) les pertes par effet Joule au stator en charge nominale,
- e) les pertes par effet Joule au rotor en charge nominale,
- f) la puissance mécanique utile et le rendement,
- g) le moment du couple utile.

Réponse: 3.0%, 0.89, 300 W, 288 W, 426 W, 13.8kW, 93.5%, 135.7 Nm.

- 6.** Une machine asynchrone fonctionne en générateur sur le réseau interconnecté.

Ses caractéristiques de fonctionnement sont les suivantes :

$U = 380 \text{ V}$ couplage en étoile,
 $I = 5 \text{ A}$,
 $\cos \varphi = 0.65$,
 $\eta = 80\%$.

Déterminer :

- a) la puissance active fournie au réseau,
- b) la puissance réactive absorbée,
- c) la puissance mécanique absorbée.

Pour les mêmes conditions de fonctionnement, on désire obtenir un $\cos \varphi = 1.0$ en branchant des capacités.

Calculer :

- d) le courant dans la ligne,
- e) le courant dans le moteur.

Réponse: 2145 W, 2356 var, 2681 W, 3.25 A, 5 A.

4. Exploitation des générateurs

4.1	Plaques signalétiques	57
4.2	Bornier – couplage	62
4.3	Fonctionnement en réseau interconnecté	64
4.3.1	Caractéristiques de fonctionnement sous $U = \text{cte}$ et $f = \text{cte}$	64
4.3.2	Réglage de la puissance active P	64
4.3.3	Réglage de la puissance réactive, du $\cos \varphi$	66
4.3.4	Mise en marche	68
4.4	Fonctionnement en réseau isolé	70
4.4.1	Caractéristiques	70
4.4.2	Réglage de la fréquence	71
4.4.3	Réglage de la tension	72
4.4.4	Charge ballast	72
4.4.5	Cas particulier d'un moteur asynchrone triphasé utilisé en génératrice pour un réseau monophasé	74
4.4.6	Mise en marche	75
4.5	Anomalies et contrôles	77

4. Exploitation des générateurs

4.1 Plaques signalétiques

Les principales indications que l'on trouve sur la plaque signalétique d'une machine électrique sont les suivantes (voir sur les figures 4.1 et 4.2 un exemple respectivement pour un moteur asynchrone et une génératrice synchrone):

1. Fabricant

2. Type

3. Numéro de série

4. Norme de référence

Dans la majorité des cas, il sera fait mention des recommandations de la CEI 34-x (Comité électrotechnique international) qui concernent les machines électriques tournantes, à l'exclusion des machines de traction.

Dans d'autres cas, il sera fait référence aux normes nationales d'un pays. Pour la Suisse, il s'agit des normes de l'ASE (Association suisse des électriciens) qui se réfèrent pour certaines parties aux recommandations de la CEI.

5. Formes d'exécution et dispositions de montage (voir tableau 4.3).

6. Protection : IPxy

Il s'agit de la protection contre les particules solides (chiffre x) et du degré d'étanchéité (chiffre y) (voir tableaux 4.4).

7. Classe d'isolation

Définit l'échauffement max., respectivement la température max. (voir tableau 4.5).

Dans la majorité des cas des machines de petite puissance, l'isolation est de classe B ou F.

8. Puissance nominale/Puissance max.

a) Machines synchrones :

Il s'agit de la puissance apparente :

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \quad (\text{VA})$$

où U et I sont les valeurs nominales de tension et de courant de la machine (voir 11 et 14).

Fabr. ①		Type : 100L4BZ ②	
Nr. 987654.001 ③		IEC 34-1 ④	
B3 ⑤	IP 54 ⑥	KL. B ⑦	
kW 2,2 ⑧	S 1 ⑨	Mot. ⑩	
V 220Δ / 380Y ⑪	Hz 50 ⑫	3 ~ ⑬	
A 8,7 / 5,0 ⑭	cos φ 0,85 ⑮		
t/min 1415 ⑯	⑰		
⑱	⑲	kg 25 ⑳	

Figure 4.1: Plaque signalétique d'un moteur asynchrone

Fabr. ①		Type GS3450-1 ②	
Nr. 7654.002 ③		IEC 34-1 ④	
B3 ⑤	IP 54 ⑥	KL. F ⑦	
VA 3'000 ⑧	S 1 ⑨	Gen. ⑩	
V 380 Y ⑪	Hz 50 ⑫	3 ~ ⑬	
A 5,0 ⑭	cos φ 0,9 ⑮		
t/min 1500 ⑯	⑰		
Excit. Ae 12,5 ⑱	Ve 75 ⑲	kg 45 ⑳	

Figure 4.2: Plaque signalétique d'une machine synchrone

La puissance active nominale que la génératrice synchrone peut fournir est :

$$P = S \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \cos \varphi$$

b) Machines asynchrones :

Il s'agit de la puissance nominale à l'arbre P_{mec} en fonctionnement moteur. La puissance active absorbée correspondante est :

$$P_{1m} = \frac{P_{\text{mec}}}{\eta} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \cos \varphi$$

où U et I sont les valeurs nominales de tension et de courant de la machine (voir 11 et 14).

La puissance max. que l'on peut fournir à un consommateur, dans le fonctionnement en génératrice, est :

$$P_{1g\text{max.}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}}, \text{ avec } \cos \varphi = 1$$

Pour des génératrices asynchrones de petite puissance, on peut admettre que cette puissance max. fournie aux bornes de la machine est :

$$P_{1g\text{max.}} = P_{\text{mec}} \text{ nominale en moteur}$$

9. Conditions de fonctionnement

Il s'agit du cycle de fonctionnement prévu pour la machine sans dépasser les limites admissibles de température. La désignation S1, par exemple, représente un fonctionnement permanent aux conditions nominales (voir tableau 4.6).

10. Type de fonctionnement prévu par le constructeur

- Mot. = en moteur
- Gen. = en générateur

11. Tension nominale/couplage

Il s'agit de la tension composée (entre 2 phases). Variations possibles à $\pm 5\%$.

Couplages :

- Triangle: Δ
- Etoile: Y

Pour les machines synchrones, le couplage du bobinage du stator est toujours en étoile (pour éliminer l'harmonique 3 de la tension composée).

Pour les connexions correspondant au couplage, voir paragraphe 4.2.

13. Fréquence nominale

Fréquence pour laquelle la machine a été dimensionnée.

14. Courant nominal

Il s'agit du courant de ligne. C'est la valeur pour laquelle l'échauffement max. est garanti. La durée d'un dépassement éventuel doit être limitée de manière à ne pas endommager l'isolation du bobinage.

15. Facteur de puissance $\cos \varphi$

- a) *Machines synchrones* : valeur pour laquelle le circuit d'excitation a été dimensionné.
- b) *Machines asynchrones* : valeur correspondant à la charge nominale en fonctionnement moteur.

16. Vitesse de rotation

- a) *Machines synchrones* : vitesse synchrone.
- b) *Machines asynchrones* : vitesse n_m correspondant à la puissance nominale (8) dans un fonctionnement en moteur.

Dans le cas d'un moteur asynchrone utilisé en génératrice, on peut estimer la vitesse n_g correspondant aux puissance et fréquence nominales à partir de la vitesse n_m indiquée sur la plaque signalétique d'un moteur :

$$n_g = 2 \cdot n_s - n_m$$

où n_s est la vitesse synchrone du champ tournant.

17. Sens de rotation

Vu du côté accouplement. Parfois cette indication n'est pas gravée sur la plaque signalétique, mais sur la carcasse de la machine.

18/19. Courant/Tension au rotor

- a) *Machines synchrones* avec bobinage d'excitation au rotor :
 - le courant d'excitation A_e est celui qui correspond aux valeurs nominales de tension, de courant et de $\cos \varphi$ indiquées sur la plaque signalétique. C'est la valeur pour laquelle l'échauffement max. est garanti ;
 - la tension d'excitation V_e est celle qui correspond au courant A_e par la relation : $V_e = R_e \cdot A_e$, où R_e est la résistance de l'enroulement d'excitation à 75°C .

b) *Machines asynchrones* à rotor bobiné :

- la valeur de tension est celle qui correspond à la tension induite aux bornes du rotor ouvert, à l'arrêt;
- la valeur du courant est celle qui correspond au courant induit pour la charge nominale, le bobinage rotorique étant court-circuité.

20. Autres indications

La masse, ou l'inertie, ou le type de refroidissement, ou....











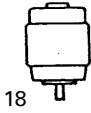

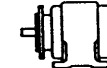

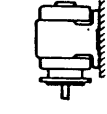

Moteur à pattes de fixation	horizontal				
	vertical				
Moteur à bride de fixation Brides à trous lisses traversants	horizontal				
	vertical				
Moteur à bride Brides à trous taraudés	horizontal				
	vertical				
	horizontal				
	vertical				

Tableau. 4.3: Formes d'exécution et dispositions de montage (CEI 34-7)

Lettres caractéristiques IP	Protection contre la pénétration de corps solides et de liquide (eau)
1 ^{er} chiffre caractéristique x: 0 à 6	Degré de protection contre la pénétration de corps solides
2 ^e chiffre caractéristique y: 0 à 8	Degré de protection contre la pénétration d'eau

1^{er} chiffre caractéristique x	Degré de protection	2^e chiffre caractéristique y	Degré de protection
0	Pas de protection	0	Pas de protection
1	Protection contre les corps > 50 mm	1	Protection contre les chutes verticales de gouttes d'eau
2	Protection contre les corps > 12 mm	2	Protection contre les chutes d'eau pour une inclinaison maximale de 15°
3	Protection contre les corps > 2,5 mm	3	Protection contre l'eau « en pluie »
4	Protection contre les corps > 1 mm	4	Protection contre les projections d'eau
5	Protection contre la poussière	5	Protection contre les jets d'eau
6	Etanchéité à la poussière	6	Protection contre les paquets de mer
		7	Protection contre les effet de l'immersion
		8	Protection contre l'immersion prolongée

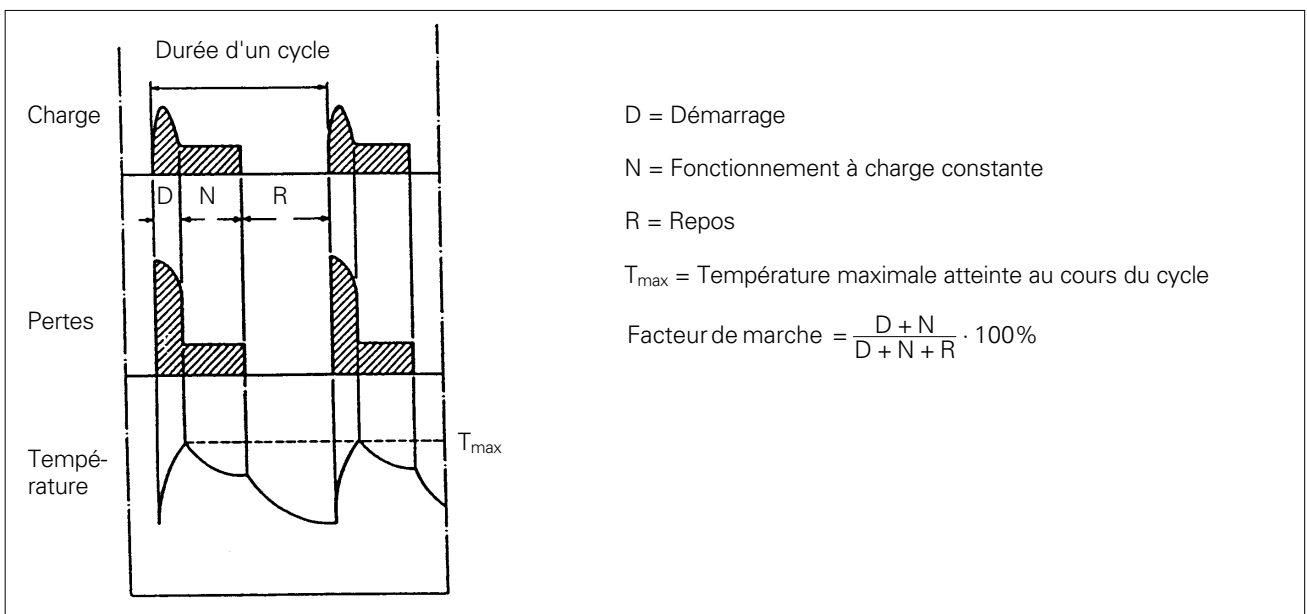
Tableaux 4.4: Type de protection (CEI 34-5 – 1991 + DIN 40'050)

Classe d'isolation	Echauffement max.	Température max.
A	60°C	105°C
E	75°C	120°C
B	80°C	130°C
F	105°C	155°C
H	125°C	180°C

Tableau 4.5: Classe d'isolation et limites d'échauffement/température pour machines de puissance inférieure à 200 kW (CEI 34-1)

Désignation service type	Fonctionnement
S1	Service continu
S2	Services temporaires
S3	Services intermittents périodiques
S4	Services intermittents à démarrage
S5	Services intermittents à démarrage et freinage électrique
S6	Services interrompus à charge intermittente
S7	Services interrompus à démarrage et freinage
S8	Services interrompus à changement de vitesse périodique

Tableau 4.6: Cycles de fonctionnement (CEI 34-1)



Exemple: Service type S4 – intermittent périodique à démarrage

4.2 Bornier – couplage

Un bornier de machine électrique triphasée comporte :

a) pour le stator : 3 ou 6 bornes

- S’il n’y a que 3 bornes, le couplage du bobinage (étoile ou triangle) est formé à l’intérieur de la machine. Le seul moyen de connaître le couplage est de se référer à la plaque signalétique.
- S’il y a 6 bornes, le couplage se fait selon les figures 4.7. et 4.8.

Pour changer le sens de rotation du rotor (pour un moteur) ou le sens du champ tournant, il faut croiser les connexions sur les deux phases extrêmes.

b) pour le rotor :

- Cas des machines synchrones : 2 bornes (alimentation à courant continu).
- Cas des machines asynchrones à rotor bobiné : 3 (ou 4) bornes.

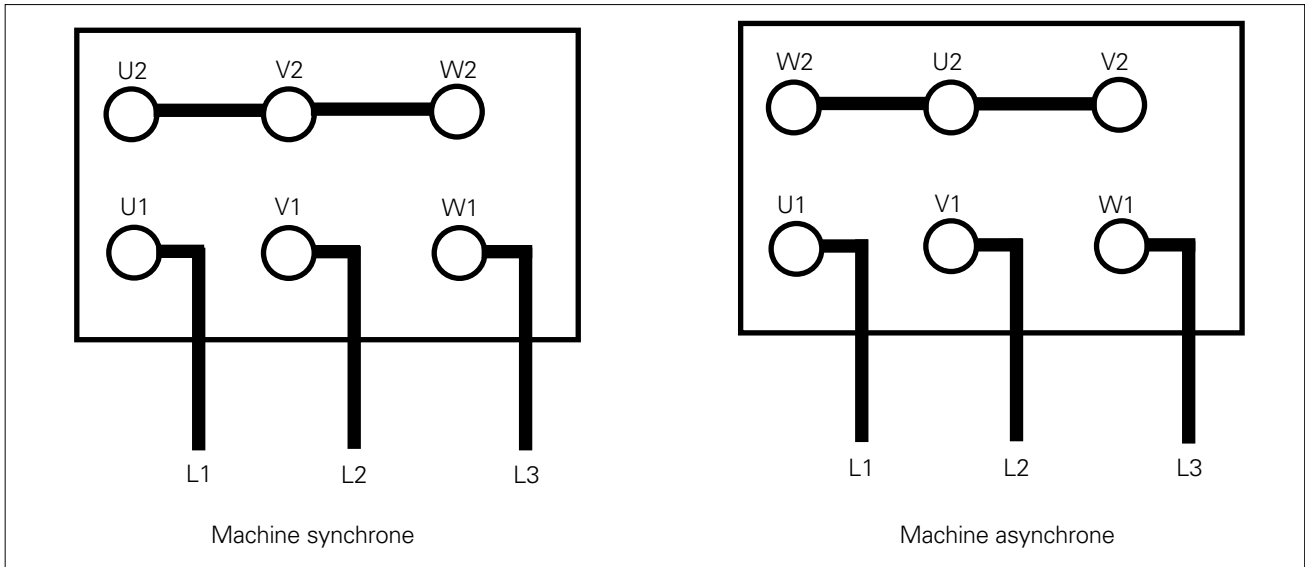


Figure 4.7: Couplage étoile

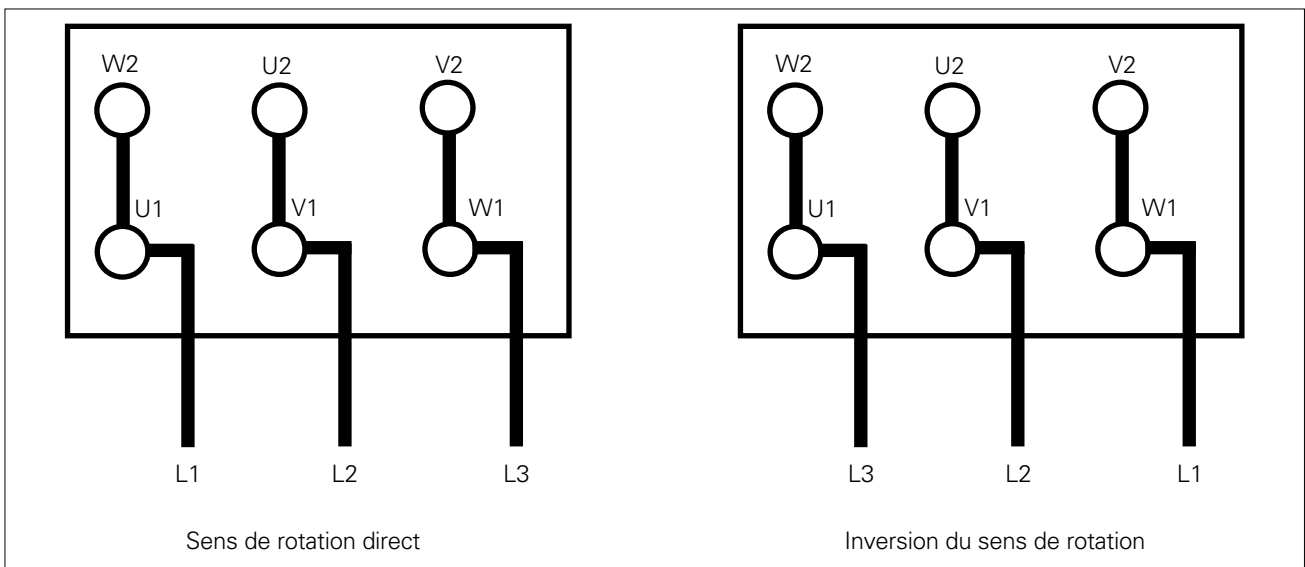


Figure 4.8: Couplage triangle d'une machine asynchrone

Caractéristiques génératrice synchrone à $U = \text{cte}$ et à $f = \text{cte}$

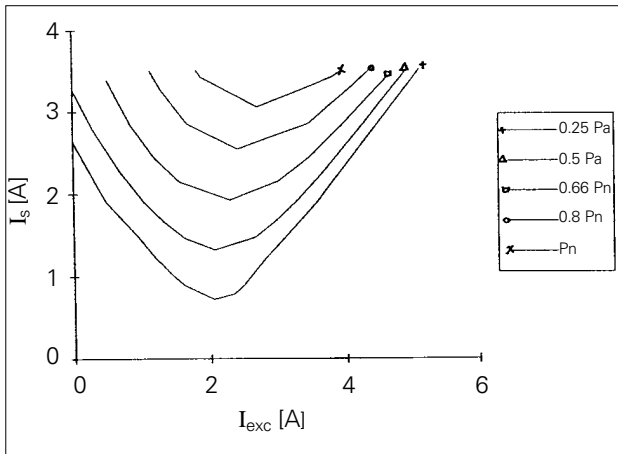


Figure 4.9: Courbes en « V » d'une machine synchrone de 2300 VA – 3 x 380 V – 50 Hz

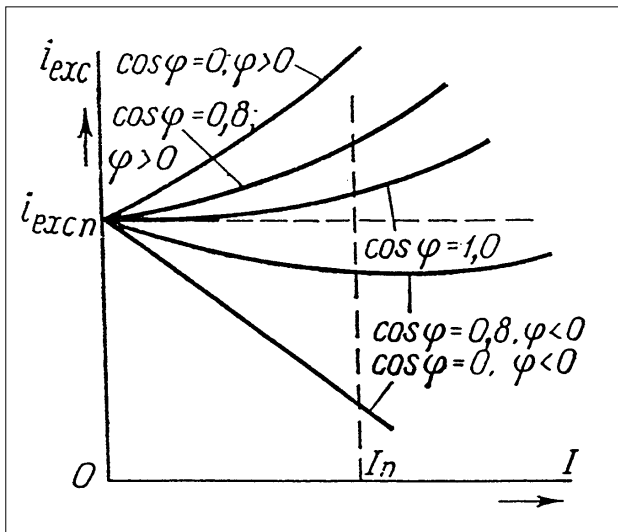


Figure 4.10: Caractéristiques de réglage

4.3 Fonctionnement en réseau interconnecté

On entend par réseau interconnecté, le réseau principal où **la tension U et la fréquence f sont rigides**, c'est-à-dire que leur valeur ne varie pratiquement pas en fonction de la charge.

Les 2 types de génératrices, synchrone et asynchrone, sont analysés du point de vue de :

- leurs caractéristiques ;
- des réglages des puissances active et réactive ;
- de leur mise en marche pour produire de l'énergie sur le réseau principal.

4.3.1 Caractéristiques de fonctionnement sous $U = \text{cte}$ et $f = \text{cte}$

a) Machines synchrones

Les caractéristiques les plus intéressantes pour l'exploitant, en cas de fonctionnement à tension et fréquence constantes, sont les suivantes :

- les courbes en « V » représentant la variation du courant stator en fonction du courant d'excitation pour différentes valeurs de puissance active à débit variable (figure 4.9) ;
- les caractéristiques de réglage représentant la variation du courant d'excitation en fonction du courant stator, pour différentes valeurs du facteur de puissance $\cos \varphi$ (figure 4.10).

b) Machines asynchrones

- Variation de la vitesse en fonction du couple mécanique (figure 3.36).
- Variation du courant, du facteur de puissance, du rendement en fonction de la puissance fournie (figure 3.38).

4.3.2 Réglage de la puissance active P

Pour les 2 types de machines, la puissance active fournie par la génératrice est fonction du débit d'eau à disposition. Il faut donc prévoir un régulateur agissant sur le débit (vanne motorisée, distributeur, pointeau, ...). Le régulateur de la turbine a pour fonction de maintenir un niveau d'eau constant (prise d'eau) pour assurer la mise en pression de l'installation (voir brochure PACER « Régulation et sécurité d'exploitation »).

Remarques:

- a) Si les puissances nominales de la turbine et de la génératrice ne correspondent pas tout à fait, la puissance active, donc le débit, doit être limitée de façon à ce que le courant nominal de la génératrice ne soit pas dépassé (limitation de l'ouverture de la turbine).
- b) Pour les génératrices asynchrone et synchrone, si le débit d'eau est trop faible, la machine peut fonctionner en moteur et absorber de la puissance au réseau. Dans ce cas, la génératrice doit être déconnectée du réseau.
- c) Dans le cas des centrales au fil de l'eau, s'il n'y a pas de possibilité de régler le débit, la puissance active variera en fonction des variations naturelles du débit et de la hauteur de chute.

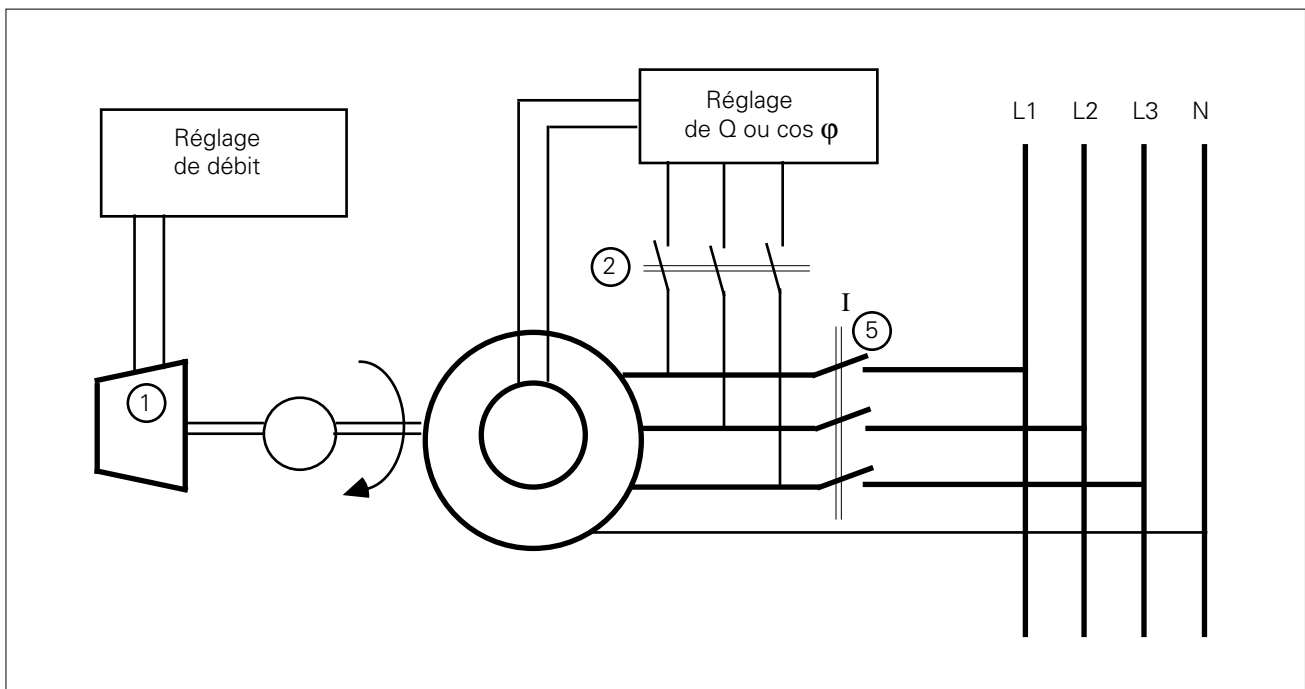


Figure 4.11: Schéma global d'une installation (machine synchrone) avec réglages de débit d'eau et de courant d'excitation

- 1 = Turbine
- 2 = Contacteur d'alimentation de l'excitation
- 5 = Disjoncteur de connexion au réseau

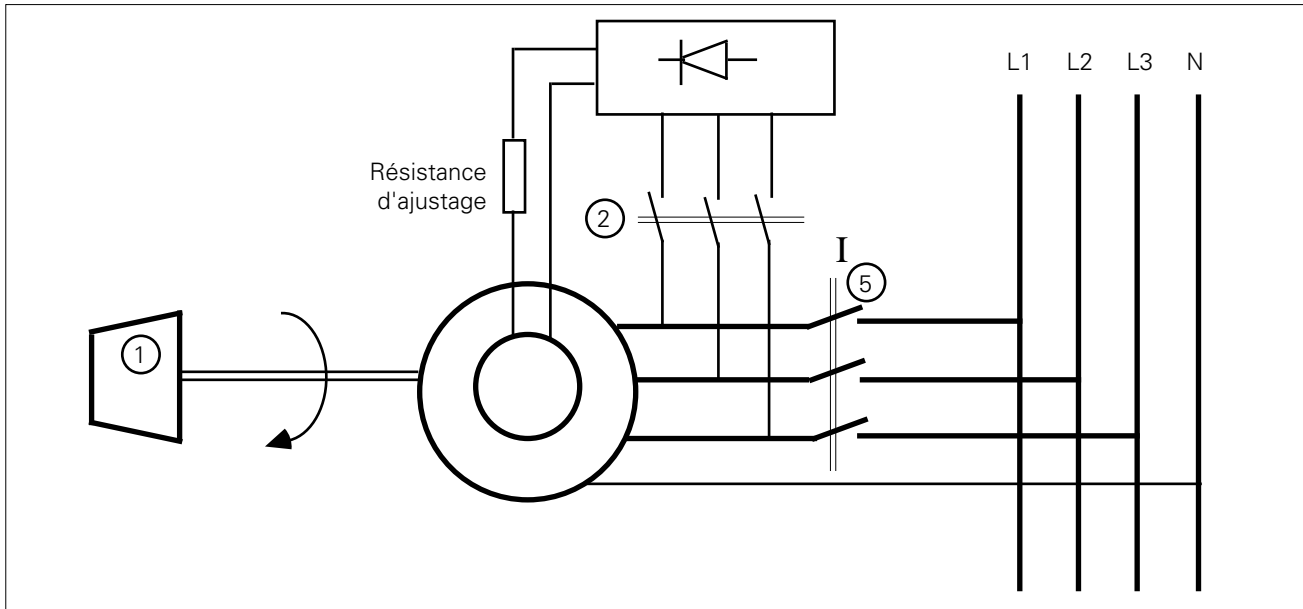


Figure 4.12: Schéma global sans réglage de débit à $I_{exc} = cte$ (cas d'une machine synchrone)

- 1 = Turbine
- 2 = Contacteur d'alimentation de l'excitation
- 5 = Disjoncteur de connexion au réseau

4.3.3 Réglage de la puissance réactive, du $\cos \varphi$

La puissance réactive est nécessaire aux consommateurs qui possèdent des moteurs à courant alternatif.

a) Cas des machines synchrones

Le réglage de la puissance réactive se fait au moyen du réglage du courant d'excitation.

Pour augmenter la puissance réactive fournie au réseau (inductif $\varphi > 0$), il faut augmenter le courant d'excitation par rapport au fonctionnement à vide (sans charge).

Si l'on diminue le courant d'excitation par rapport au fonctionnement à vide, la machine absorbe de l'énergie réactive (réseau capacitif $\varphi < 0$).

Dans tous les cas, il faut surveiller le courant du stator pour qu'il ne dépasse pas le courant nominal.

Remarque:

En cas de coupure du réseau par défaut (voir chapitre 7.4.3), le système d'excitation doit aussi être déconnecté.

b) Cas des machines asynchrones

La machine asynchrone absorbe toujours de la puissance réactive, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice.

L'amplitude de cette puissance réactive varie avec la charge.

Si elle doit être compensée pour améliorer le facteur de puissance d'une valeur $\cos \varphi_1$ à une autre $\cos \varphi_2$, il faut installer une batterie de condensateurs, à raison d'un condensateur par phase de capacité C_{phase} .

$$C_{\text{phase}} = \frac{P (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)}{3 \cdot \omega \cdot U_{\text{Cphase}}^2}$$

avec $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

La compensation parfaite est celle qui correspond à $\cos \varphi_2 = 1$ ($\varphi_2 = 0$). En pratique la compensation se fait à $\cos \varphi_2 = 0,9$.

Pour les génératrices asynchrones de petite puissance, l'angle φ_1 , correspondant aux conditions nominales, peut être estimé par:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_{\text{mec n}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne n}} \cdot I_{\text{ligne n}}}$$

Remarque:

En cas de coupure du réseau par défaut (voir chapitre 7.4.3), les condensateurs doivent aussi être déclenchés.

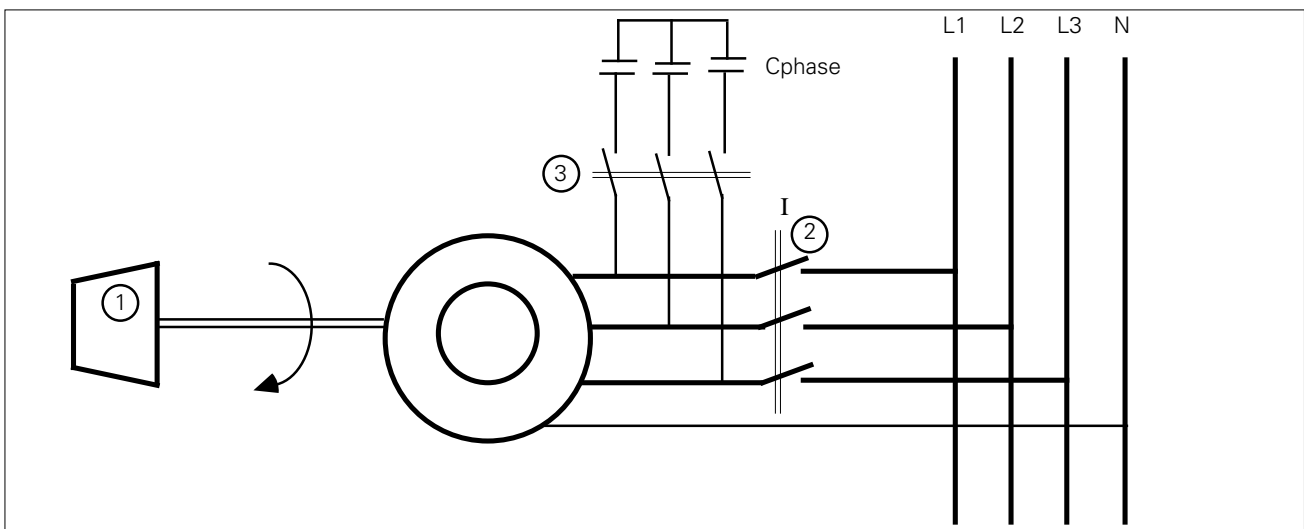


Figure 4.13: Schéma global sans réglage de débit (cas d'une machine asynchrone) avec compensation
 1 = Turbine; 2 = Disjoncteur de connexion au réseau; 3 = Contacteur d'enclenchement des condensateurs

Exemple :**Plaque d'un moteur :**2200 W - 380 V étoile - 5 A - 50 Hz - $\cos \varphi_1 = 0,85$ **Les résultats de mesure d'un fonctionnement à vide en moteur sont :** $P_{\text{elo}} = 220 \text{ W} - 380 \text{ V étoile} - \cos \varphi_0 = 0,11$ **Fonctionnement en générateur***Sous charge nominale:* $P_{\text{el}} = 2200 \text{ W} - 380 \text{ V étoile} - 50 \text{ Hz} - \cos \varphi_1 = 0,67$ Calcul de la capacité pour compenser le $\cos \varphi$ à 1 sous charge nominale:

$$C_{\text{phase}} = \frac{2200 \cdot 1,11}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 220^2} = 53,5 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 53,5 \mu\text{F}$$

La puissance réactive totale fournie par la batterie de condensateurs de 53,5 μF par phase est de:

$$Q_{\text{Ctot}} = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_{\text{ph}}^2 = 2440 \text{ var}$$

En fonctionnement à vide (sans échange de puissance active avec le réseau), la puissance réactive nécessaire à magnétiser la machine asynchrone est de:

$$Q_o = P_{\text{elo}} \cdot \text{tg } \varphi_o = 220 \cdot 9,04 = 1988 \text{ var}$$

En gardant la même valeur de capacité (53,5 μF) qu'en fonctionnement en générateur à charge nominale, il y a un surplus de puissance réactive de 452 var (2440 – 1988) qui est donc fourni par la batterie de condensateurs au réseau interconnecté.

4.3.4 Mise en marche**a) Machine synchrone**

Les 4 conditions de mise en parallèle d'une génératrice synchrone sur un réseau interconnecté sont:

- mêmes sens du champ tournant;
- mêmes fréquences;
- mêmes tensions;
- phase nulle entre les 2 systèmes triphasés de tensions.

Les opérations pour satisfaire ces conditions sont les suivantes (figures 4.11 et 4.12) :

- ① Démarrer le groupe au moyen de la turbine de manière à atteindre la vitesse synchrone.
- ② Alimenter le bobinage rotorique de la machine synchrone (excitation), au moyen d'une source variable à courant continu, jusqu'à obtenir la tension nominale aux bornes du stator.
- ③ Vérifier, au moyen d'un appareil adéquat, que le sens du champ tournant de la machine synchrone est le même que celui du réseau.
- ④ Ajuster la fréquence et la tension de la machine synchrone pour qu'elles soient les mêmes que celles du réseau.
- ⑤ Lorsque les 2 systèmes triphasés de tension du réseau et de la machine synchrone sont en phase, enclencher le disjoncteur I (ou le contacteur).

Les opérations de mise en charge sont les suivantes :

- ⑥ Pour augmenter la charge active fournie au réseau, augmenter le débit d'eau dans la turbine.
- ⑦ Pour changer la puissance réactive, ou le facteur de puissance $\cos \varphi$, varier le courant d'excitation dans le bobinage du rotor de la machine synchrone.

b) Machine asynchrone

La mise en marche de la génératrice asynchrone est plus simple que pour la machine synchrone (figure 4.13).

- ① Démarrer le groupe au moyen de la turbine de manière à atteindre approximativement la vitesse synchrone.
- ② Enclencher le disjoncteur I (ou le contacteur) permettant d'interconnecter la génératrice asynchrone et le réseau. Une pointe de courant (environ 5 fois le courant nominal) apparaîtra au moment de l'enclenchement. La machine asynchrone est capable de supporter cette surintensité temporaire. Cependant, les protections doivent être prévues en conséquence.

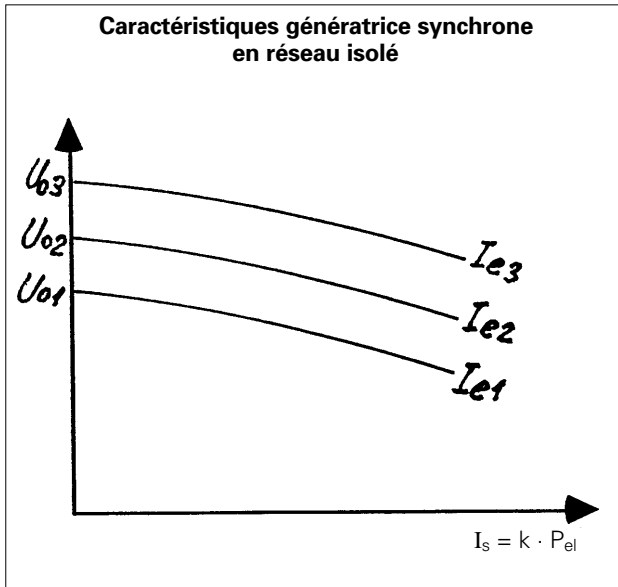


Figure 4.14: Variation $U(I_s)$ à $f = \text{cte}$ et à $\cos \varphi = 1$ pour différents courants d'excitation

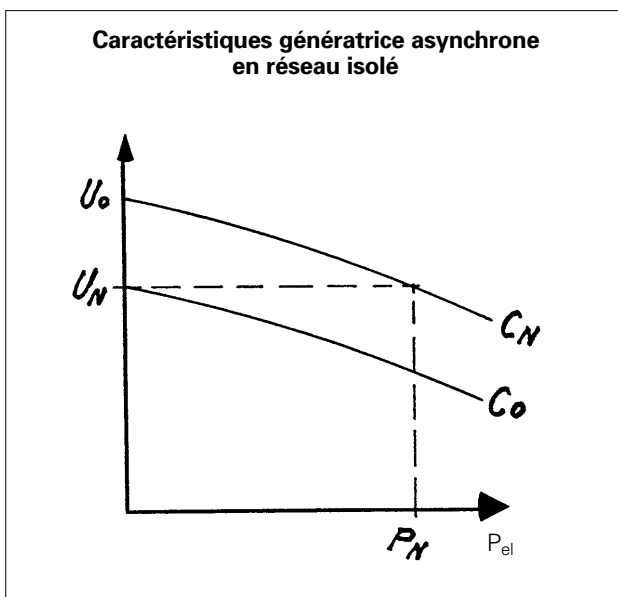


Figure 4.15: Variation $U(P)$ pour 2 condensateurs de capacité C_0 et C_N

- ③ Enclencher la batterie de condensateurs, s'il y a compensation du facteur de puissance.
- ④ Pour augmenter la charge active fournie au réseau, augmenter le débit d'eau dans la turbine.

N.B. L'échange de puissance réactive avec le réseau dépend de la valeur des capacités de la batterie de condensateurs (cf. Exemple sous 4.3.3b).

4.4 Fonctionnement en réseau isolé

On appelle réseau isolé :

- le cas d'une station de production qui fournit de l'énergie électrique à un ou plusieurs consommateurs, la centrale pouvant comporter 2 générateurs par exemple ;
- ou le cas de 2 stations de production qui fournissent en parallèle de l'énergie électrique à plusieurs consommateurs.

Dans le cas d'un réseau isolé, les tension et fréquence délivrées varient en fonction de la charge : $U \neq \text{cte}$ et $f \neq \text{cte}$

4.4.1 Caractéristiques

a) Machine synchrone

- Caractéristiques externes représentant la variation de la tension en fonction de la charge (ou du courant stator) à fréquence constante :
 - à courant d'excitation constant pour différents $\cos \varphi$ (figure 3.29) ;
 - pour différents courants d'excitation et différents $\cos \varphi$ (figure 4.14).
- Vitesse en fonction de la charge : dépend de la caractéristique de la turbine.

b) Machine asynchrone

– Tension en fonction de la charge (ou du courant du stator) pour une fréquence constante et pour différentes valeurs de capacités (figure 4.15).

A titre d'exemples :

- la figure 4.16 montre les caractéristiques $U(P)$ et $I(P)$, mesurées à fréquence constante, pour une machine de 3 kW;
- la figure 4.17 montre la forme de $U(P)$ à débit constant avec une caractéristique de turbine déterminée.

– Vitesse en fonction du couple mécanique pour garder une fréquence constante (figure 3.36).

4.4.2 Réglage de la fréquence

La valeur à mesurer est la fréquence avec pour consigne la fréquence nominale. La fréquence peut se mesurer :

- par la fréquence de la tension de l'alternateur ;
- ou par une machine auxiliaire donnant une tension proportionnelle à la fréquence (uniquement dans le cas d'une génératrice synchrone).

Pour les 2 types de machines, le réglage de la fréquence, c'est-à-dire de la vitesse de rotation, se fait par le réglage du débit d'eau dans la turbine en fonction de la charge.

Dans les cas où le débit n'est pas réglé, il faut alors prévoir une charge ballast (voir paragraphe 4.4.4).

a) Machines synchrones

Maintenir la vitesse constante égale à la vitesse synchrone.

b) Machines asynchrones

Il faudrait varier la vitesse (au-dessus de la vitesse du synchronisme). En pratique, on peut obtenir une fréquence plus ou moins constante (à $\pm 5\%$) par le maintien d'une tension constante.

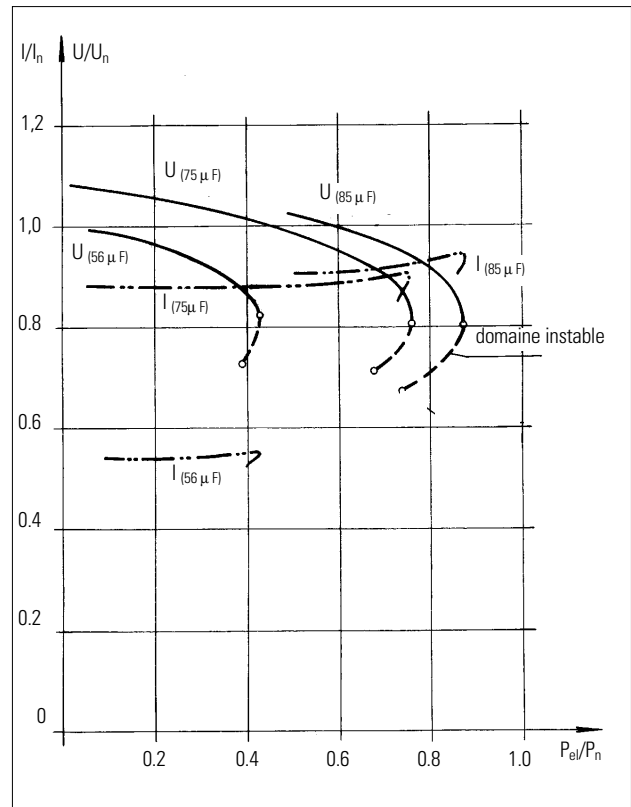


Figure 4.16: Variations $U(P)$ et $I(P)$ – Exemple d'une machine asynchrone de 3kW

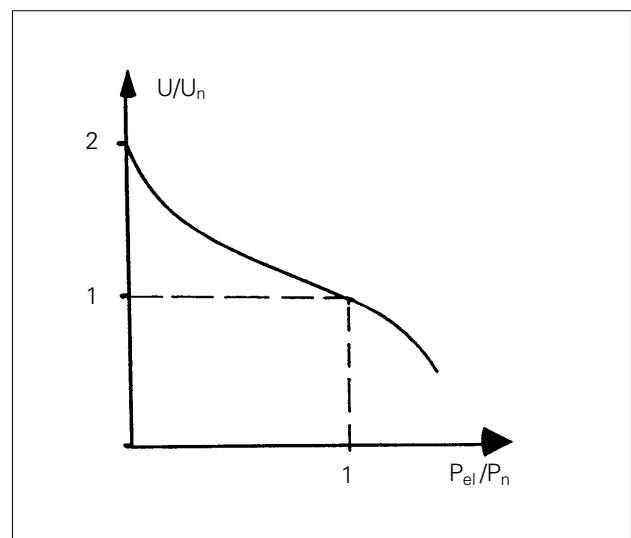


Figure 4.17: Variation $U(P)$ pour une caractéristique de turbine où, à puissance nulle, la vitesse est égale à 2 fois la vitesse nominale

4.4.3 Réglage de la tension

La valeur à mesurer est la tension aux bornes du (des) consommateur (s) avec pour consigne la tension nominale.

a) Machine synchrone

Se fait par le réglage du courant d'excitation par l'intermédiaire d'un régulateur de tension.

b) Machine asynchrone

Devrait se faire en variant les condensateurs d'excitation en fonction de la charge. Cependant, ceci étant impossible à un coût raisonnable, il faut choisir une capacité moyenne de manière à ce que les variations de tension ne dépassent pas les limites de $\pm 10\%$.

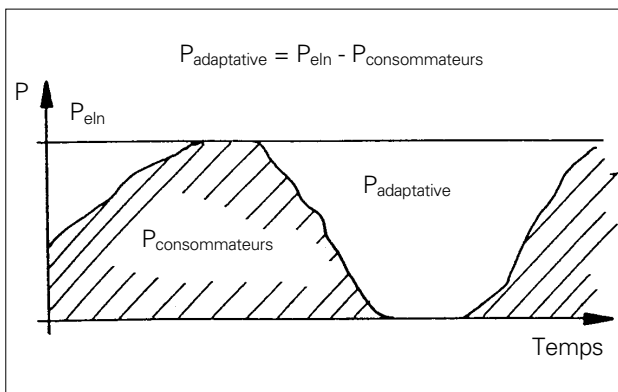


Figure 4.18: Principe de la charge ballast (ou adaptative)

4.4.4 Charge ballast

Dans le cas où le débit d'eau n'est pas réglé, il faut prévoir une charge ballast (ou adaptative) correspondant à la puissance électrique nominale. La résistance ballast est connectée en parallèle avec le consommateur.

La puissance totale fournie par la génératrice est (figure 4.18) :

$$P_{\text{eIn}} = P_{\text{ballast}} + P_{\text{consommateur}}$$

Cette puissance ne doit pas dépasser la puissance nominale de la génératrice.

Si $P_{\text{consommateur}} = 0$, alors: $P_{\text{ballast}} = P_{\text{eIn}}$

Si $P_{\text{consommateur}} = P_{\text{eIn}}$, alors: $P_{\text{ballast}} = 0$

Si $P_{\text{consommateur}} > P_{\text{eIn}}$, alors: il faut déclencher le groupe.

Si f ou U baissent, c'est que la puissance demandée par les consommateurs est plus élevée que la puissance nominale. Il faut alors diminuer la charge ballast.

Il faut donc prévoir un régulateur de la charge ballast qui surveille soit la fréquence, soit la tension aux bornes du consommateur.

Pour autant que le $\cos \varphi$ de la charge ne varie pas, ce système permet d'éviter :

- pour la génératrice synchrone, un régulateur de tension ;
- pour la génératrice asynchrone, le réglage des capacités.

Exemple de calcul d'une résistance ballast

Cas de la machine de l'exemple 4.3.3.b.

La puissance active électrique nominale est de:
2200 W - 50 Hz - 220 V (tension de phase)

La résistance ballast est calculée comme suit :

$$R_{B\text{phase}} = \frac{U_{\text{ph}}^2}{\frac{P_{\text{el.n}}}{3}} = \frac{3 \cdot 220^2}{2200} = 66 \Omega / \text{phase}$$

Le courant qui traversera cette résistance sera :

$$I_{RB} = \frac{U_{\text{ph}}}{R_B} = \frac{220}{66} = 3,33 \text{ A}$$

4.4.5 Cas particulier d'un moteur asynchrone triphasé utilisé en génératrice pour un réseau monophasé

Moyennant certaines conditions, un moteur asynchrone triphasé industriel peut être utilisé en génératrice monophasée. En effet, pour éviter une dissymétrie trop importante entre les 3 phases de la machine, il faut en particulier prendre garde au calcul et aux connexions correctes des capacités (figure 4.19).

La capacité C_1 se calcule comme suit :

$$C_1 = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot \omega \cdot R_{ch}}$$

et la capacité $C_2 = 2 \cdot C_1$

avec

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

R_{ch} : résistance de charge correspondant à la puissance électrique nominale

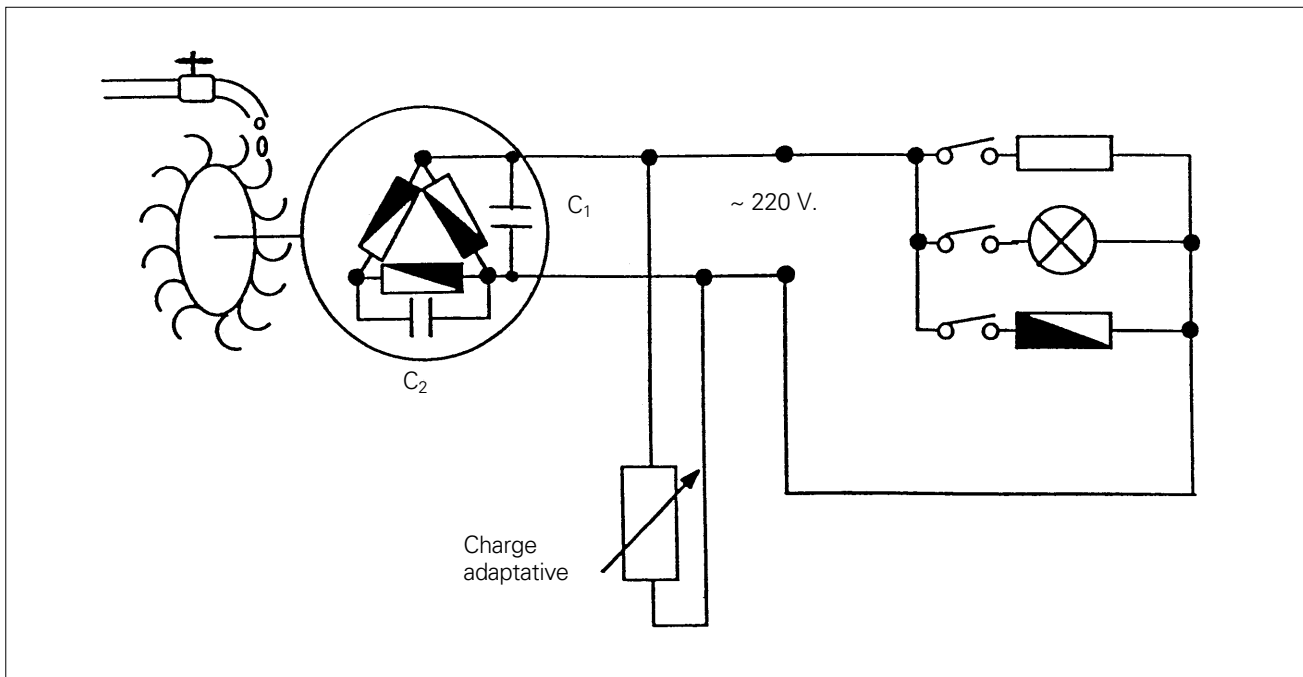


Figure 4.19: Génératrice asynchrone triphasée utilisée en monophasé avec charge ballast

4.4.6 Mise en marche

a) Machine synchrone (figure 4.20)

- ① Démarrer le groupe au moyen de la turbine de manière à atteindre la vitesse synchrone. La vitesse sera maintenue constante par le régulateur de fréquence.
- ② Alimenter le bobinage du rotor, par une source variable à courant continu, de manière à atteindre la tension nominale aux bornes du stator (habituellement régulateur de tension).
- ③ Enclencher le disjoncteur sur les consommateurs.

Les régulateurs de fréquence et de tension, ou éventuellement le régulateur par charge ballast, entrent automatiquement en fonction sitôt que la vitesse synchrone est atteinte

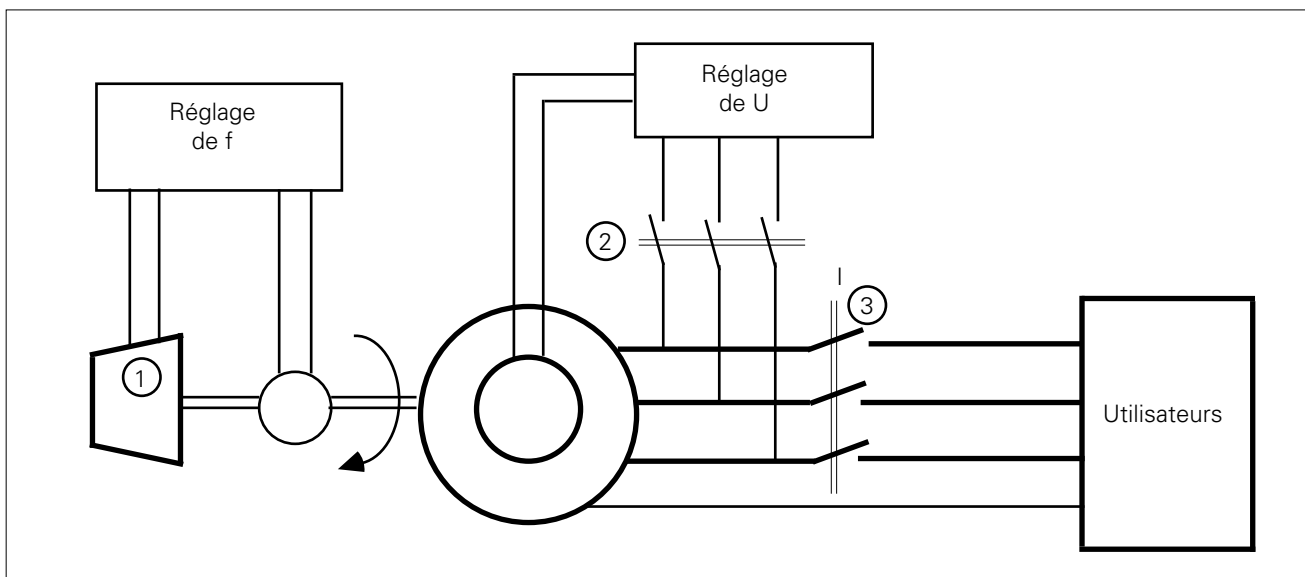


Figure 4.20: Mise en marche de machine synchrone en réseau isolé

- 1 = Turbine
- 2 = Contacteur d'enclenchement du système d'excitation
- 3 = Disjoncteur (contacteur) de connexion à la charge

b) Machine asynchrone (figure 4.21)

- ① Démarrer le groupe au moyen de la turbine de manière à atteindre approximativement la vitesse synchrone.
- ② Enclencher les capacités. Il se produit alors la montée en tension aux bornes du stator par le phénomène d'amorçage et auto-excitation.

La figure 4.22 représente:

- la caractéristique saturée $U(I_\mu)$ de la machine asynchrone,
- la droite $U_c(I_c)$ de la capacité, avec:

$$U_c = \frac{I_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

L'intersection des 2 courbes représente le point de fonctionnement à vide.

Pour qu'il y ait amorçage, la génératrice doit avoir une tension rémanente de 2 à 3 V au moins.

- ③ Enclencher le disjoncteur sur les consommateurs.

La suite des opérations est automatique au moyen du régulateur, éventuellement par charge ballast.

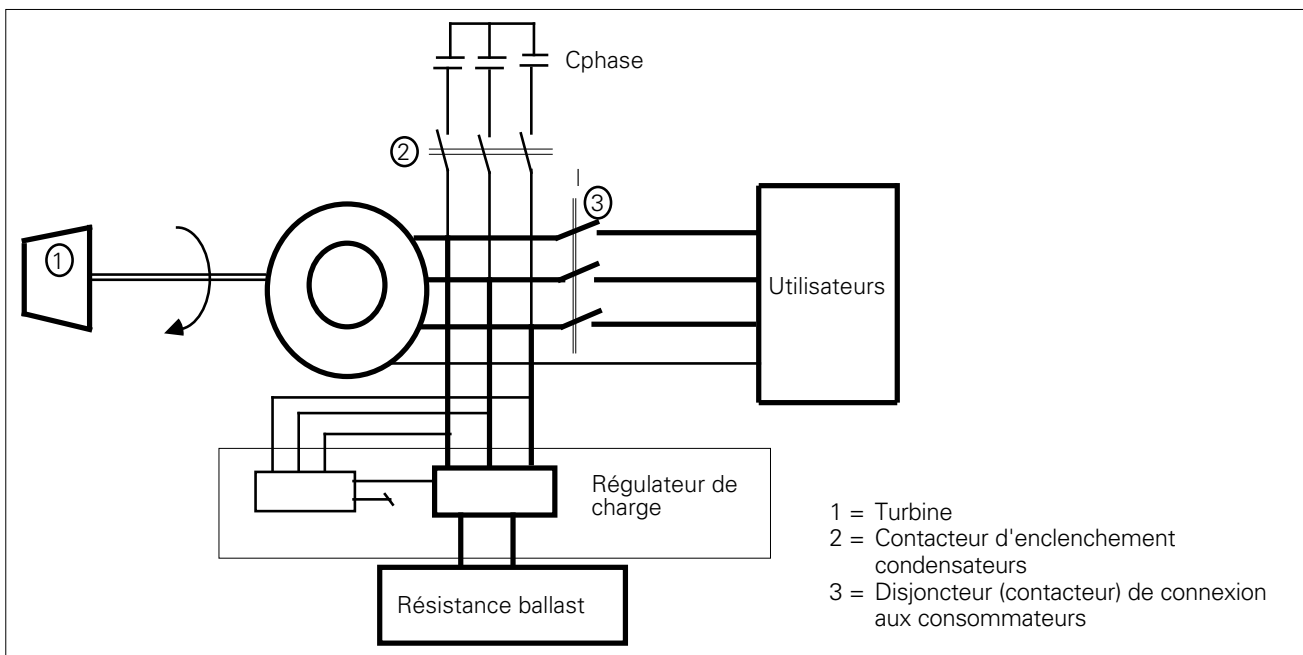


Figure 4.21: Mise en marche de machine asynchrone en réseau isolé avec charge ballast

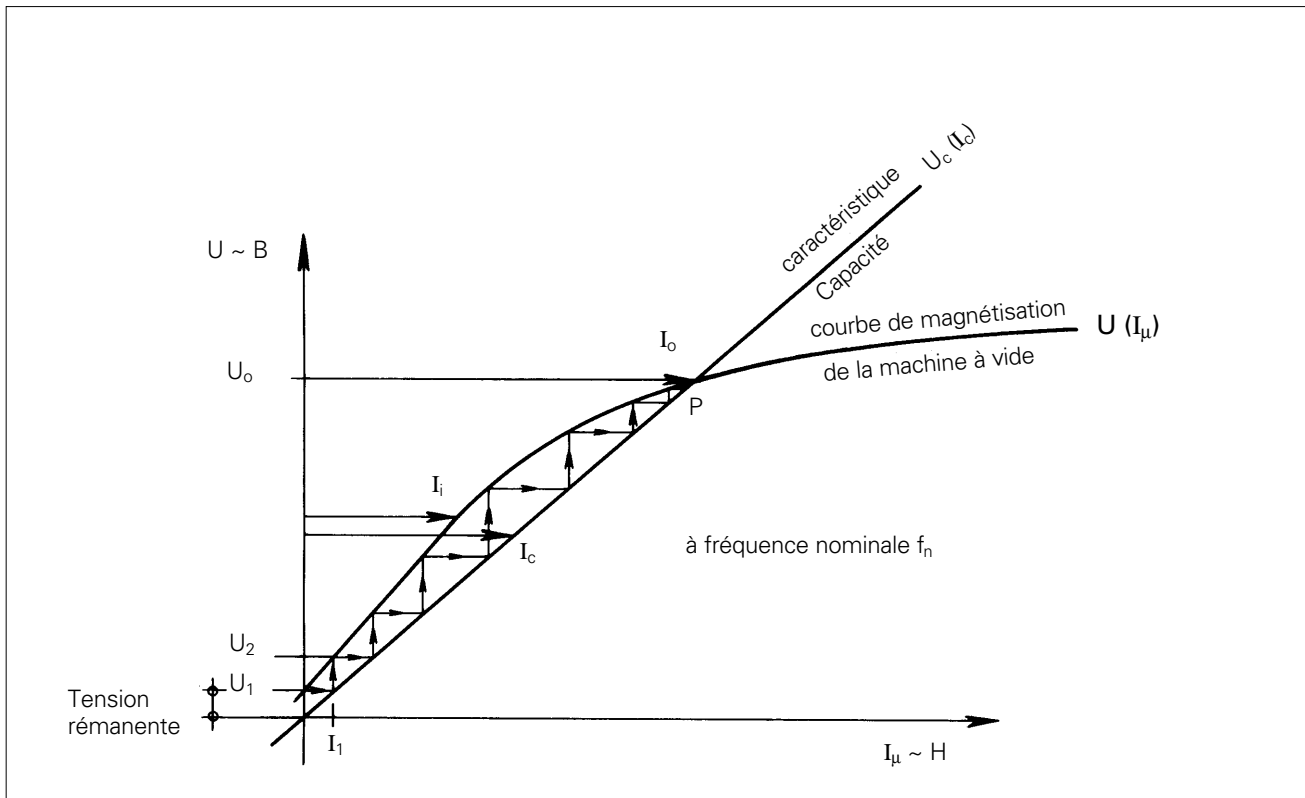


Figure 4.22: Auto-excitation d'une génératrice asynchrone

4.5 Anomalies et contrôles

Les défauts principaux qui peuvent apparaître dans une génératrice sont les suivants:

- Survitesse/Fréquence max.:
 - débit d'eau trop grand par rapport à la charge demandée,
 - coupure brusque de la charge.
- Vitesse min./Fréquence min.:
 - puissance active à fournir trop grande,
 - débit d'eau trop faible.
- Surintensité:
 - charge demandée trop importante par rapport à la puissance nominale,
 - court-circuit aux bornes.

- Surtension :
 - niveau d’excitation trop important,
 - coupure brusque de la charge.
- Sous-tension :
 - niveau d’excitation trop bas,
 - pour génératrice asynchrone en réseau isolé : désamorçage des capacités.
- Retour d’énergie

Il y a donc lieu de prévoir non seulement des protections (chapitre 7), mais aussi des appareils de mesure de tableau tels que (figure 4.23) :

- mesure de vitesse;
- mesure de la tension aux bornes;
- mesure de la fréquence;
- mesure des 3 courants stator de la génératrice;
- mesure du courant avant le réseau ou les consommateurs;
- mesure du courant d’excitation de la génératrice synchrone;
- mesure de la puissance active totale fournie;
- mesure de l’énergie fournie.

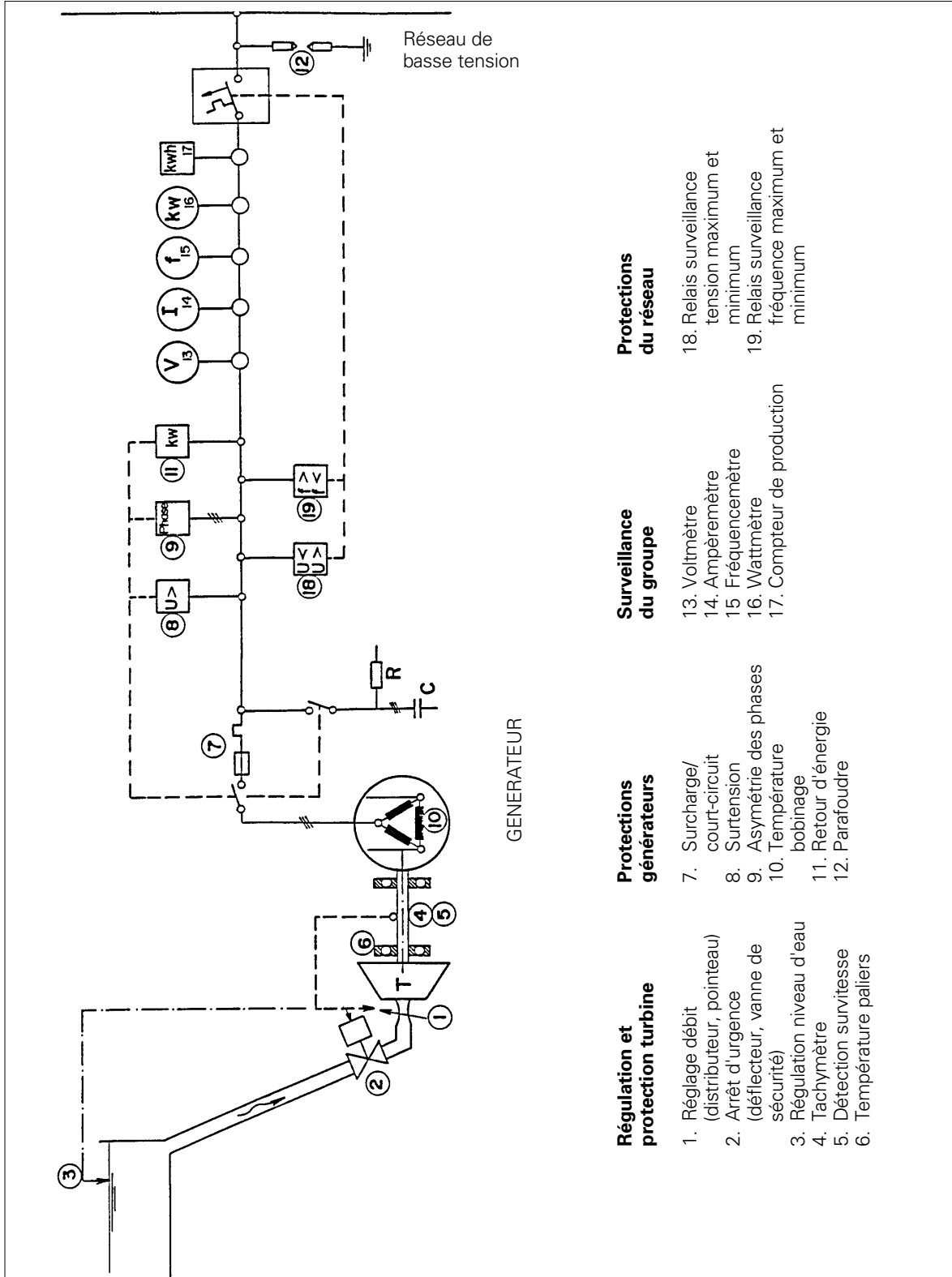


Figure 4.23: Schéma général pour le contrôle, la commande, les protections

5. Comparaison entre les générateurs synchrone et asynchrone

5.1	Qualité de l'énergie électrique	83
<hr/>		
5.2	Critères techniques de comparaison	83
5.2.1	Construction	83
5.2.2.	Maintenance et pièces détachées	83
5.2.3	Synchronisation	83
5.2.4	Système d'excitation en réseau interconnecté	84
5.2.5	Système d'excitation en réseau isolé	84
5.2.6	Régulation de U et f en réseau isolé et système d'excitation	84
5.2.7	Rendement	84
5.2.8	Survitesse	85
5.2.9	Inertie	85
<hr/>		
5.3	Comparaison des coûts à l'investissement	85

5. Comparaison entre les générateurs synchrone et asynchrone

Pour pouvoir se décider entre l'acquisition d'une machine asynchrone ou d'une génératrice synchrone, il faut se poser un certain nombre de questions en commençant par les exigences du consommateur quant à la qualité de l'énergie électrique fournie.

Le choix dépend non seulement des contraintes économiques, mais aussi des limites techniques, surtout au niveau des problèmes du réglage de la tension et de la fréquence, influencés eux-mêmes par le type de réglage hydraulique.

5.1 Qualité de l'énergie électrique

Les différentes charges sont dimensionnées pour fonctionner sous une tension et une fréquence nominales les plus constantes possibles. Les appareils électriques doivent pouvoir fonctionner avec une certaine tolérance de tension, en général $\pm 10\%$.

La conséquence pour les résistances (lampes, corps de chauffe,...), soumises à des variations de tension, est une diminution de la durée de vie.

Les moteurs alternatifs et les transformateurs sont aussi sensibles aux variations de tension et de fréquence. En effet, il faut se rappeler que le couple des moteurs asynchrones varie avec le carré de la tension d'alimentation (chapitre 3). Quant aux réactances inductives, elles varient proportionnellement à la fréquence (chapitre 2), provoquant une augmentation du courant quand la fréquence baisse.

Les réseaux interconnectés ont une fréquence très constante de 50 Hz (ou 60 Hz). La tension est de 400/230 V, avec une tolérance prévue en 2006 de $\pm 10\%$, alors qu'actuellement la variation admise est de -10% à $+6\%$.

Lorsque les génératrices fonctionnent en réseau isolé, le problème des variations de tension et de fréquence sera soigneusement étudié. Les limites de ces variations devront se trouver dans la même fourchette que celle du réseau industriel.

5.2 Critères techniques de comparaison

La comparaison portera sur des considérations liées à la construction, à la maintenance, au système d'excitation, au système de réglage. A chaque poste, il faudra attribuer des points en fonction des priorités du moment, de façon à pouvoir choisir en toute connaissance de cause.

5.2.1 Construction (voir chapitre 3)

- *Machine asynchrone:*
Les rotors à cage d'écureuil sont simples et robustes. Il en résulte une grande fiabilité. Les moteurs asynchrones sont fabriqués en très grande série pour les petites et moyennes puissances.
- *Machine synchrone:*
Elle nécessite une bobine d'excitation qui doit être alimentée en courant continu, soit par une source externe à travers des bagues et des charbons, soit par l'intermédiaire d'une machine auxiliaire alternative et des diodes tournantes.

5.2.2 Maintenance et pièces détachées

- *Machine asynchrone:*
L'entretien est réduit au minimum. Les pièces détachées sont toujours disponibles grâce à l'utilisation très répandue des moteurs asynchrones.
- *Machine synchrone:*
Le risque de réparations est plus grand, surtout aux niveaux des charbons, des diodes tournantes, des bobines d'excitation. Les pièces détachées ne sont pas toujours disponibles à cause du marché restreint surtout dans certaines régions comme les pays en développement.

5.2.3 Synchronisation

- *Machine asynchrone:*
Pas nécessaire. Toutefois, à l'enclenchement sur le réseau, il apparaît une pointe de courant dont la durée dépend de la valeur du glissement au moment de la connexion.
- *Machine synchrone:*
Pour un fonctionnement sur un réseau intercon-

necté, nécessité d'un synchronoscope pour contrôler les 3 conditions de synchronisation (voir chapitre 4).

Pour les machines de très petite puissance (<1kVA), on peut à la limite se dispenser de cet équipement.

5.2.4 Système d'excitation en réseau interconnecté

La tension et la fréquence sont fixées par le réseau industriel.

On veillera à fonctionner à puissance active nominale.

- *Machine asynchrone:*
La puissance réactive d'excitation étant fournie par le réseau, aucune capacité n'est en principe nécessaire. Cependant, il est préférable de compenser le $\cos \varphi$ de la génératrice par une capacité en parallèle (en général pour obtenir un $\cos \varphi$ égal à 0,9), dimensionnée pour la charge nominale (voir chapitres 3 et 4).
- *Machine synchrone:*
Alimentation du système d'excitation, associée au régulateur de tension, par le réseau industriel. Si l'on désire régler le $\cos \varphi$, on agira sur le courant d'excitation par l'intermédiaire du régulateur.
Pour des génératrices de petite puissance (<500kW), on peut fonctionner, par souci d'économie, à courant d'excitation fixe, c'est-à-dire sans régulateur de tension.

5.2.5 Système d'excitation en réseau isolé (voir chapitre 4)

- *Machine asynchrone:*
Au moyen de capacités en parallèle.
Les charges inductives doivent être compensées pour elles-mêmes au moyen de capacités. Si leur puissance réactive varie, celle-ci doit être compensée à la valeur minimale. Une valeur trop élevée de capacité peut provoquer une augmentation excessive de la tension lorsque la charge baisse.
- *Machine synchrone:*
Alimentation du système d'excitation, associée au régulateur de tension, par soutirage sur la machine synchrone.

5.2.6 Régulation de U et f en réseau isolé et système d'excitation

• Le système hydraulique comprend un réglage de débit

Dans ce cas, la **fréquence** est ajustée par le réglage de vitesse, donc du débit.

Pour le réglage de la **tension** :

- *Machine asynchrone:*
Excitation par des capacités en parallèle. En général, 2 valeurs de capacités suffisent à garantir la tension dans la tolérance de $\pm 10\%$. La commutation sur l'une ou l'autre des capacités dépendra du niveau de tension (relais de tension).
On tiendra compte de la remarque 5.2.5. en ce qui concerne les consommateurs de puissance réactive.
- *Machine synchrone:*
Régulateur de tension agissant sur le courant d'excitation.

• Le système hydraulique ne comprend pas de réglage de débit

La **fréquence et la tension** sont réglées par une charge ballast (voir chapitre 4):

- a) Si la puissance réactive de la charge est constante
 - *Machine asynchrone:*
Une seule capacité suffit
 - *Machine synchrone:*
Régulateur de tension pas nécessaire
- b) Si la puissance réactive de la charge varie:
 - *Machine asynchrone:*
Il faut prévoir 2 capacités dont les valeurs seront calculées de manière à ce que la variation de **tension** en fonction de la charge ne sorte pas de la tolérance de $\pm 10\%$. La commutation sur l'une ou l'autre des capacités dépendra du niveau de tension (relais de tension).
 - *Machine synchrone:*
Régulateur de **tension** agissant sur le courant d'excitation.

5.2.7 Rendement

- *Machine asynchrone:*
Le rendement et le facteur de puissance diminuent fortement à puissance réduite (débit inférieur au débit nominal).

Le rendement est inférieur à celui des machines synchrones. Pour l'améliorer, on peut bobiner spécialement les machines.

- *Machine synchrone:*
Le rendement est encore bon à charge partielle.

5.2.8 Survitesse

- *Machine asynchrone:*
De façon pratiquement usuelle:
 - Machines à 4 pôles: $n_{\max} \approx 2.n_N$
 - Machines à 2 pôles: $n_{\max} = 1,2.n_N$
- *Machine synchrone:*
A spécifier en fonction de la turbine utilisée. Les valeurs de survitesse élevées, par rapport à la valeur nominale de vitesse, augmentent le prix à l'achat.

5.2.9 Inertie

- *Machine asynchrone:*
Faible inertie. D'où la nécessité parfois d'accoupler un volant d'inertie pour amortir les oscillations de vitesse lors de variations brusques de la charge ou pour limiter l'accélération du groupe et par là éviter le coup de bélier.
- *Machine synchrone:*
Inertie plus grande que pour les machines asynchrones.

5.3 Comparaison des coûts à l'investissement

Pour que la comparaison des prix à l'achat soit valable, il faut confronter les générateurs synchrone ou asynchrone avec leur système d'excitation et de réglage en tension et en fréquence.

Fonctionnement en parallèle avec un réseau interconnecté

La génératrice asynchrone est plus avantageuse qu'une génératrice synchrone pour des puissances jusqu'à 50 kVA, voire 100 kVA.

Pour des puissances moyennes, au-dessus de 100 kVA, les prix sont compétitifs, d'autant plus que des machines asynchrones de cette puissance ne sont pas disponibles couramment.

Fonctionnement en réseau isolé

Jusqu'à 25 kVA, la génératrice asynchrone présente des avantages économiques, à condition de pouvoir accepter des variations de fréquence et de tension (voir chapitre 4 et paragraphe 5.2.6).

Toutefois, il faut préciser qu'actuellement, sur le marché, la génératrice synchrone avec son système d'excitation et de réglage est plus courante que la génératrice asynchrone.

Certes, comme cela a été spécifié précédemment, le fonctionnement d'un moteur asynchrone industriel en génératrice est possible avec des capacités et une charge ballast. Cependant, la diffusion actuelle sur le marché d'un tel système de production est limitée.

6. Informations concernant le cahier des charges d'un générateur

6.1	Introduction	89
6.2	Informations à soumettre au fournisseur	89
6.2.1	Informations générales	89
6.2.2	Spécifications du générateur	89
6.2.3	Accessoires spécifiés de cas en cas	89
6.3	Documents/informations à recevoir avec l'offre	90
6.4	Vérification des performances	90

6. Informations concernant le cahier des charges d'un générateur

6.1 Introduction

Généralement, le générateur fait partie de la fourniture du fabricant de turbine, ce qui a l'avantage de bien définir les responsabilités. Dans ce cas, le fabricant de la turbine porte la responsabilité globale tant au point de vue de la garantie des rendements que de la tenue mécanique du groupe.

Ceci n'empêche pas le client de faire lui-même une comparaison qualité/prix de générateurs de provenances différentes et d'imposer finalement la machine électrique de son choix au turbinier. L'achat direct d'un générateur est aussi possible, en particulier si la machine électrique est indépendante mécaniquement de la turbine (par exemple s'il y a un multiplicateur de vitesse à courroie).

6.2 Informations à soumettre au fournisseur

6.2.1 Informations générales

Données du site :

- situation géographique;
- altitude de la centrale.

Fonctionnement de la centrale :

- en parallèle sur le réseau ou en régime isolé.

Conditions d'exploitation :

- service permanent ou intermittent;
- température ambiante maximale dans la centrale;
- environnement (humidité, condensation, poussière...).

Remarque: si l'altitude est supérieure à 1000 m et/ou la température à 40°, la puissance nominale d'un générateur doit être diminuée pour tenir compte de la réduction de l'efficacité du refroidissement.

Turbine :

Type (Pelton, Francis, Crossflow, Kaplan, autre)

- disposition du groupe:
 - axe horizontal ou vertical;
 - monobloc, accouplement direct, entraînement via multiplicateur.

6.2.2 Spécifications du générateur

Type :

- synchrone ou asynchrone

Données en liaison avec la turbine :

- puissance mécanique à l'arbre;
- vitesse de rotation;
- vitesse et durée d'emballement.

Données en liaison avec le réseau électrique :

- tension nominale avec variation relative tolérée;
- nombre de phases;
- fréquence;
- couplage du bobinage (étoile ou triangle, étoile si liaison avec conducteur neutre désirée).

Données en liaison avec l'environnement :

- classe d'isolation (peut aussi être proposée par le constructeur);
- degré de protection IP.

Données en liaison avec l'exécution mécanique et son montage sur la turbine :

- bout d'arbre normal ou allongé pour recevoir la roue de la turbine;
- 2^e bout d'arbre (par exemple pour recevoir un volant d'inertie dont le poids et le diamètre seront indiqués);
- types de paliers, lisses ou à roulements;
- lubrification : huile, graisse;
- durée de vie calculée des paliers;
- paliers standard ou renforcés (en fonction des charges élevées dues à la tension d'une courroie de transmission ou d'une roue de turbine; ces charges seront indiquées).

6.2.3 Accessoires spécifiés de cas en cas

- Sonde tachymétrique (mesure vitesse, signal pour détection survitesse et pour détection instant d'enclenchement d'un générateur asynchrone sur le réseau)
- Sonde température bobinage (protection sur-échauffement)
- Sonde température paliers (protection paliers)
- Capteur de vibrations des paliers (éventuel)

- Module de réglage pour fonctionnement parallèle (générateur synchrone)
- Régulateur de tension (générateur synchrone en îlot).

6.3 Documents/informations à recevoir avec l'offre

- Fabricant, type et désignation de la machine
- Spécifications et descriptifs techniques (réponses en fonction du § 6.2)
- Dessin d'encombrement et poids
- Moment d'inertie du rotor
- Rendements garantis en fonction de la puissance
- Facteur de puissance ($\cos \varphi$) garanti en fonction de la puissance
- Autres paramètres électriques utiles tels que courant à vide et en court-circuit.

6.4 Vérification des performances

Certains constructeurs de générateurs disposent de bancs d'essai qui permettent une vérification directe des performances en présence du client. Il est utile de faire usage de cette possibilité, car une mesure précise du rendement du générateur permet d'éviter tout conflit avec le turbinier au moment des essais de réception sur site. En effet, ceux-ci ne permettent que la mesure du rendement total (turbine, éventuel multiplicateur et générateur). Connaissant avec précision le rendement du générateur, il est possible d'en déduire avec exactitude le rendement de la turbine.

7. Protection et sécurité des installations

7.1	Bases légales	93
------------	----------------------	----

7.2	Dangers de l'électricité	96
7.2.1	Effets du courant électrique sur le corps humain	96
7.2.2	Sécurité des personnes	97
7.2.3	Sécurité des choses	98
7.2.4	Protection complémentaire	98

7.3	Protection des installations	100
7.3.1	Conditions générales	100
7.3.2	Sélectivité entre coupe-surintensité	100

7.4	Protection des machines tournantes	102
7.4.1	Surcharge	102
7.4.2	Surintensité	103
7.4.3	Marche en parallèle avec le réseau	103
7.4.4	Traitement du point neutre	103
7.4.5	Protection contre les défauts d'isolement	105
7.4.6	Réglage de tension (type de régulateur)	105
7.4.7	Liaisons équipotentielles	106
7.4.8	Protection atmosphérique	106
7.4.9	Liste des appareils de commande, de protection et de lecture	107
7.4.10	Liste des dispositifs donnant un arrêt d'urgence	109

7.5	Obligations juridiques	110
7.5.1	Obligation de présenter un projet	110
7.5.2	Définitions	112
7.5.3	Critères d'augmentation du danger par une installation de production d'énergie	113
7.5.4	Personnes autorisées à installer	113
7.5.5	Personnes autorisées à contrôler	113
7.5.6	Contrôles périodiques	113

7. Protection et sécurité des installations

7.1 Bases légales

Pour l'exécution, la modification, l'entretien et le contrôle de petites centrales de production d'énergie électrique, les ordonnances correspondantes et les règles techniques reconnues doivent être appliquées.

Nombre de promoteurs ou propriétaires de petites centrales de production d'énergie électrique ne sont pas des électriciens et ne connaissent souvent pas les dangers et les prescriptions qui sont liés à ce type d'installation. Il est de ce fait un devoir des personnes qui mettent ces installations sur le marché d'informer leurs clients sur les dangers et les prescriptions découlant des lois et ordonnances en vigueur.

Loi, ordonnances et prescriptions appliquées aux installations électriques de production		
Loi fédérale concernant les installations électriques à faible et à fort courant	RS 734.0	LIE
Ordonnance sur les installations électriques à courant fort	RS 734.2	OICF
Ordonnance sur les installations électriques à basse tension	RS 734.27	OIBT
Ordonnance sur les matériels électriques à basse tension	RS 734.26	OMBT
Ordonnance sur la procédure d'approbation des projets d'installations à courant fort	RS 734.25	OPIC
Ordonnance sur l'Inspection fédérale des installations à courant fort	RS 734.24	OIFICF
Communications de l'Inspection fédérale des installations à courant fort (IFICF)		
Marche en parallèle de générateurs électriques avec les réseaux basse tension		STI 219.1081
Installations de production d'énergie à basse tension		STI 229.0987
La sécurité et l'obligation de présenter un projet pour de petites installations de production d'énergie		STI 232.1289
Normes techniques ASE		
Installations à basse tension		NS ASE 1000-1, 2 & 3

En plus des normes électriques, les normes de sécurité découlant de la Loi sur l'assurance accidents (LAA) doivent être respectées. L'article 82 de la LAA (RS 832.20) exige que l'employeur prenne, pour prévenir les accidents et maladies professionnels, toutes les mesures dont l'expérience a démontré la nécessité, que l'état de la technique permet d'appliquer et qui sont adaptées aux conditions données.

Des réalisateurs ne prennent parfois que le critère coût en considération, ce qui entraîne une diminution de la sécurité pour le personnel lors de l'exploitation et l'entretien.

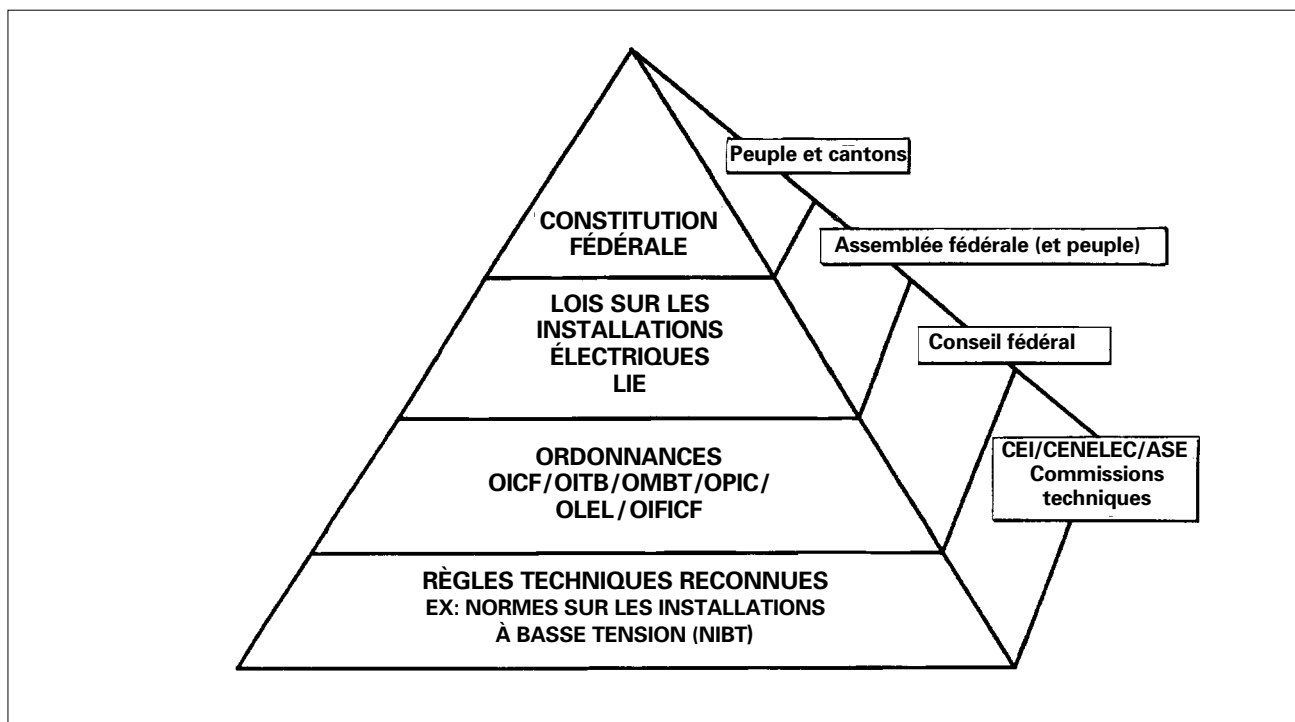


Figure 7.1: Normalisation dans l'électricité

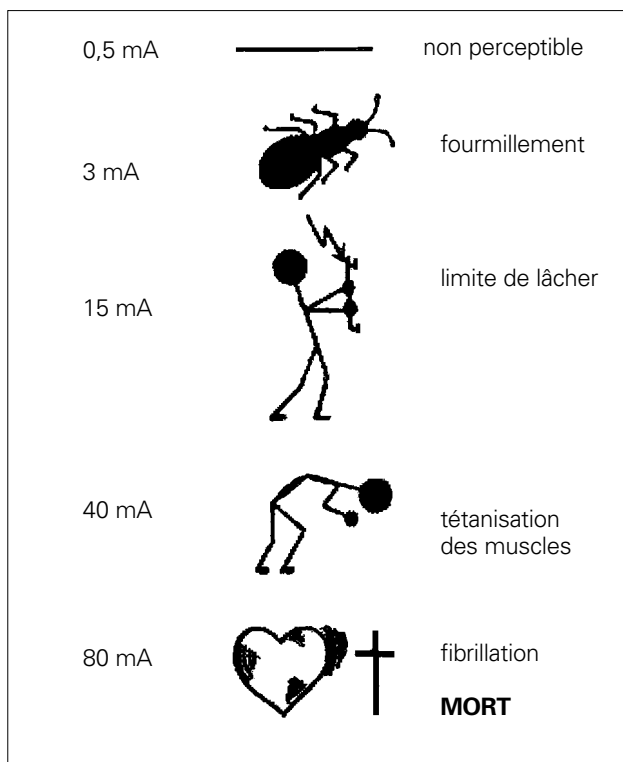


Figure 7.2: Effets physiologiques du courant à 50 Hz

7.2 Dangers de l'électricité

7.2.1 Effets du courant électrique sur le corps humain

Le courant électrique a pour effet d'exciter et de contracter les muscles qu'il traverse. La crispation atteint le plus souvent un degré tel qu'on ne peut se libérer d'un objet sous tension saisi à pleine main. Comme les muscles respiratoires sont également atteints, les victimes perdent bientôt connaissance. Cela étant, il n'est pas surprenant que les techniciens en matière de sécurité cherchent à munir d'un isolement supplémentaire les parties saisissables des installations électriques.

Le courant traversant le corps influence non seulement la musculature du squelette, mais aussi celle du cœur (myocarde). Comme on le sait, la fonction du cœur est liée à un processus électrique, ou plus exactement à un processus électrochimique. De faibles impulsions de courant émanant du centre cardiorégulateur font en sorte que le myocarde se contracte à intervalles réguliers. Un courant d'intensité suffisante provenant de l'extérieur et qui traverse le myocarde trouble le rythme cardiaque. Il provoque des fibrillations ventriculaires, c'est-à-dire des mouvements spasmodiques désordonnés de certaines fibres du myocarde. Comme dans ce cas la circulation sanguine est pratiquement interrompue, la victime se trouve en danger de mort.

Le courant traversant le corps produit aussi des effets thermiques. Lorsque le courant passe dans le corps par une surface réduite, une forte densité de courant se produit à l'endroit de pénétration, ce qui engendre localement une forte élévation de température provoquant une petite brûlure. Bien souvent de telles marques de courant ne sont pas sans gravité, car elles pénètrent profondément dans la peau et les tissus détruits de la peau et de la chair forment des foyers d'infections.

La résistance de passage du courant à travers le corps humain est entre 750 et 1000 ohms. En touchant un conducteur polaire de nos installations de distribution basse tension 400/230 volts, la personne est soumise à une tension de 230 volts. L'intensité du courant qui traverse la personne sous 230 volts est de l'ordre de 230 mA à 300 mA. Seul

un disjoncteur à courant de défaut est capable de détecter ce courant si ce dernier circule par le conducteur de protection ou par une surface conductrice mise à terre (figure 7.3).

Il est recommandé de raccorder vos installations mobiles et transportables par l'intermédiaire d'un disjoncteur à courant de défaut (FI), avec un courant nominal de déclenchement ne dépassant pas 30 mA.

7.2.2 Sécurité des personnes

Les installations à courant fort et les équipements électriques qui y sont raccordés doivent être établis, modifiés, entretenus et contrôlés selon les ordonnances et les règles techniques reconnues. Lorsqu'ils sont utilisés ou exploités conformément à leur destination ainsi qu'en cas de perturbation prévisible, ils ne doivent mettre en danger ni les personnes, ni les choses. Lorsque les ordonnances ne prescrivent rien, on s'en tiendra aux règles techniques reconnues.

Sont réputées règles techniques reconnues en particulier les normes techniques internationales harmonisées. A défaut, on s'en tiendra aux normes techniques de l'Association suisse des électriciens (ASE) et aux prescriptions techniques des Telecom (PTT).

S'il n'existe pas de normes techniques spécifiques, on utilisera les normes applicables par analogie. En cas de doute, l'organe de contrôle compétent tranche. Il consulte au préalable d'autres organes de contrôle concernés.

Principe de protection des personnes

Les installations doivent être disposées et exécutées de telle sorte qu'aucun courant de contact dangereux ne puisse s'établir. Pour les organes à manœuvrer, cette condition doit être remplie même en cas de défaut de l'isolation fonctionnelle.

L'exigence de principe est considérée comme satisfaite si la tension de service ne dépasse pas 50 V. Pour les installations de tension supérieure à 50 V, elle est considérée comme satisfaite si tout contact involontaire avec des organes sous tension paraît

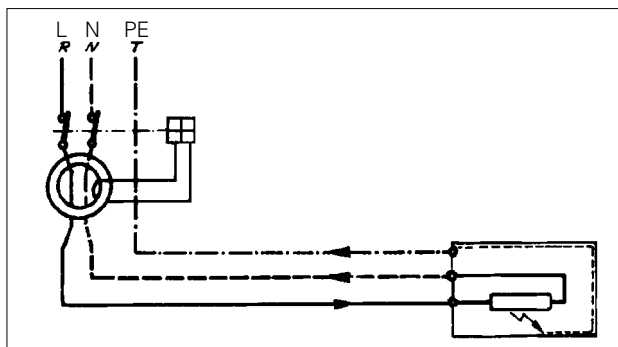


Figure 7.3: Protection par disjoncteur à courant de défaut

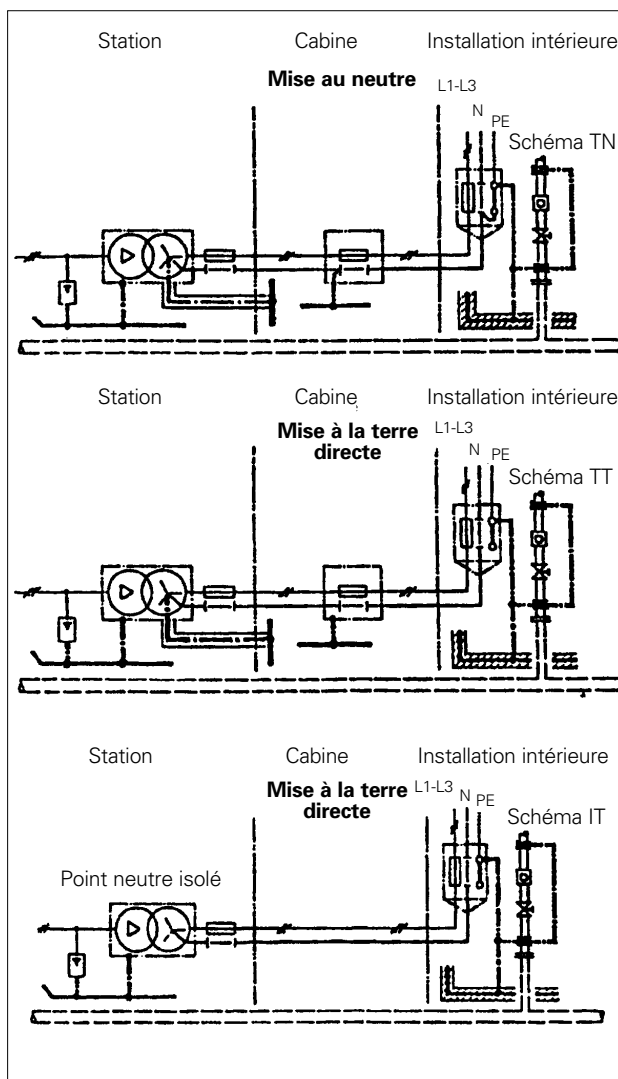


Figure 7.4: Mode de protection

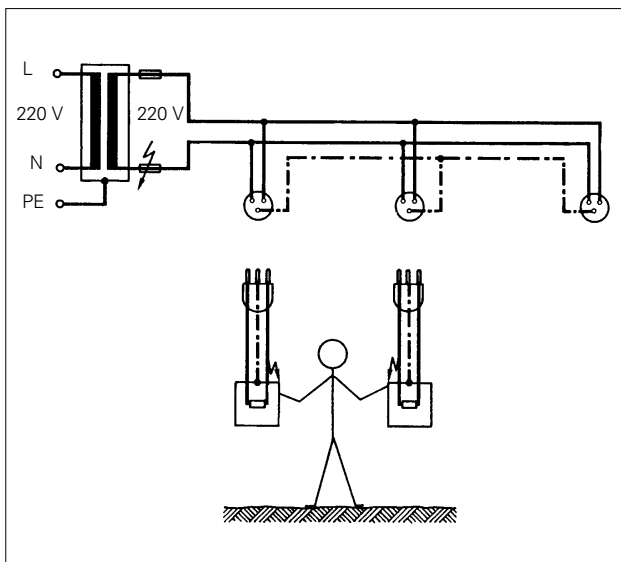


Figure 7.5: Protection par séparation

exclu et si, en outre, l'une des conditions suivantes est réalisée :

- courant de contact à 50 Hz ne pouvant pas dépasser 0,5 mA ;
- tension de défaut ne pouvant pas excéder 50 V ;
- tension de défaut supérieure à 50 V ne pouvant pas se maintenir pendant plus de 5 secondes.

Mesures de protection

Pour satisfaire aux exigences de la protection des personnes, les mesures de protection suivantes entrent en ligne de compte :

- la surisolation ou l'emplacement isolant, afin de limiter le courant de contact à une valeur suffisamment faible ;
- la mise au neutre ou la mise à la terre directe, afin de limiter la tension de défaut à une valeur suffisamment basse (figure 7.4) ;
- la mise au neutre, la mise à la terre directe ou le couplage de protection, afin de limiter la durée des tensions de défaut ou des courants de défaut inadmissibles (figures 7.6 et 7.7) ;
- la protection par séparation, afin de limiter suffisamment le courant de contact dans certaines parties d'installation (figure 7.5).

7.2.3 Sécurité des choses

Les installations doivent être disposées, exécutées et utilisées de telle sorte que les échauffements, les flammes et arcs prévisibles qui peuvent s'y produire ne risquent pas de mettre le feu à l'entourage. Ces effets doivent paraître exclus même en cas de défaut prévisible du matériel, comme aussi en cas de manipulation erronée ou négligente, mais prévisible.

Il est à relever qu'il suffit de l'énergie dégagée par le passage d'un courant de 0,5 A, circulant au travers du bois tendre humide, pour enflammer ce dernier.

7.2.4 Protection complémentaire

La protection contre des tensions dangereuses est assurée en principe dans nos installations par la mise au neutre et les liaisons équipotentielles entre carcasses métalliques d'appareils et parties métal-

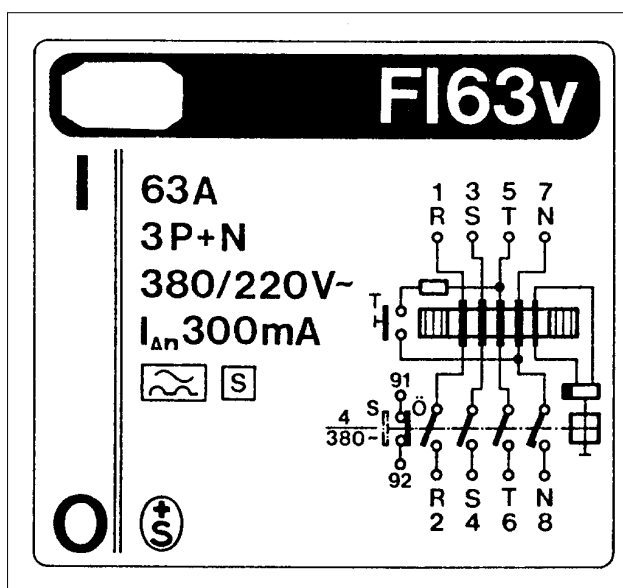


Figure 7.6: Couplage de protection à courant de défaut

liques du bâtiment. Il est autorisé d'appliquer la mise au neutre dans une installation à condition qu'à l'introduction du bâtiment le conducteur PEN (neutre) soit relié à une électrode de terre ; condition qui fixe le potentiel du bâtiment par rapport à la terre de référence (figure 7.4).

En cas de défaut d'isolement dans un appareil ou sur une installation, le courant de défaut n'atteint parfois pas la valeur de seuil nécessaire à faire fonctionner les dispositifs de protection de lignes. Ces défauts peuvent être détectés par des disjoncteurs de protection :

- à courant de défaut FI (figure 7.6) ;
- à tension de défaut FU (figure 7.7) ;
- à surveillance d'isolement.

La protection par séparation se fait sur une partie restreinte d'une installation et elle est obtenue au moyen d'un transformateur de séparation. Pour obtenir une protection à 100%, il y a lieu de ne connecter qu'un seul appareil par transformateur. Si deux ou trois appareils sont branchés par transformateur d'isolement, la sécurité des personnes ne peut être garantie qu'à la condition que toutes les parties conductrices tangibles d'appareils soient reliées entre elles au moyen d'un conducteur d'équipotentiel (figure 7.5).

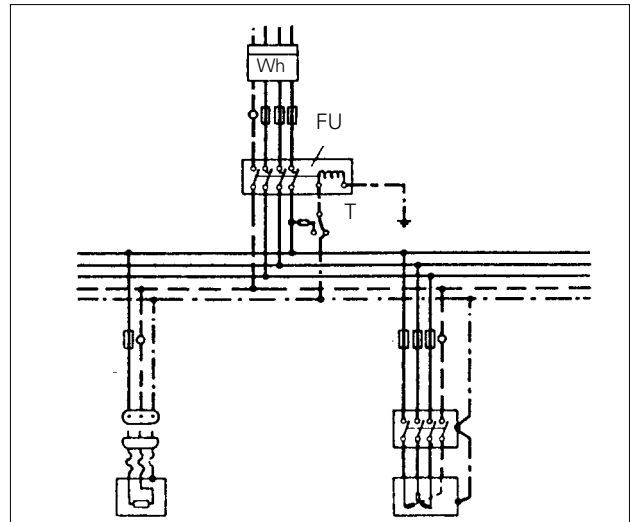


Figure 7.7: Couplage de protection à tension de défaut

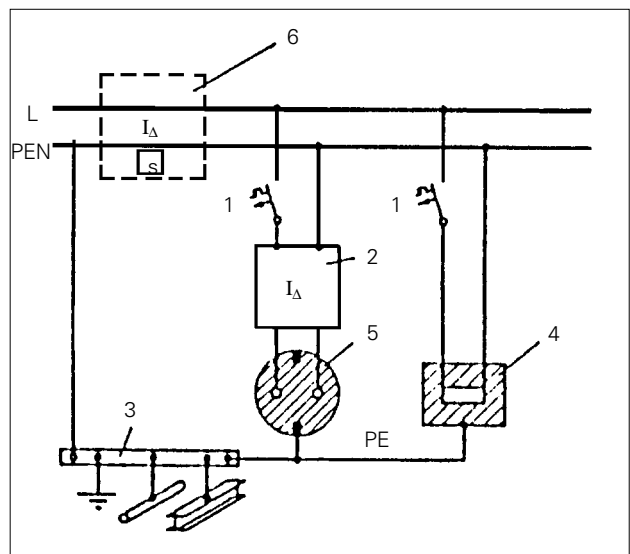


Figure 7.8: Principe de la triple sécurité avec mise au neutre

1. Dispositif de la protection contre les surintensités, c'est-à-dire en vue de garantir les conditions de mise au neutre
2. Disjoncteur à courant de défaut pour la protection supplémentaire $I_{\Delta} \leq 30 \text{ mA}$
3. Barre collective de liaison équipotentielle
4. Appareil d'exploitation mis à la terre et raccordé à demeure
5. Prise de courant avec mise au neutre et protection supplémentaire
6. Disjoncteur à courant de défaut sélectif pour la protection d'incendie, par exemple $I_{\Delta} \leq 300 \text{ mA}$

7.3 Protection des installations

7.3.1 Conditions générales

Toutes les parties d'une installation à courant fort doivent être construites de façon à résister aux sollicitations mécaniques et thermiques pouvant les frapper en régime de service ou en cas de court-circuit et de défaut à la terre ; on tiendra compte du mode de mise à terre du point neutre.

Les installations électriques doivent être construites de sorte que les perturbations et les détériorations dues aux arcs soient limitées au minimum. Il faudra empêcher que les arcs ne puissent s'étendre.

Lorsque les effets d'arcs mettent des personnes en danger immédiat, on prendra des mesures de protection spéciales (coffrages, revêtements de protection, etc.).

Déclenchement

Dans les installations à courant fort, on placera des dispositifs qui limitent autant que possible, par déclenchement, les détériorations résultant des courants de surcharge, de courts-circuits et de défaut à la terre.

Changement des conditions

Si, par suite d'extension, de transformation, de remise en état ou sous l'effet de la présence d'autres ouvrages, les conditions se trouvent modifiées à l'intérieur d'une installation à courant fort, les dispositifs de protection contre les surintensités devront être, au besoin, adaptés sans retard à la nouvelle situation.

7.3.2 Sélectivité entre coupe-surintensité

Les genres de coupe-surintensité suivants entrent en ligne de compte :

- les coupe-circuit à fusible ;
- les disjoncteurs (protecteurs) de canalisation ;
- les disjoncteurs (protecteurs) de moteur.

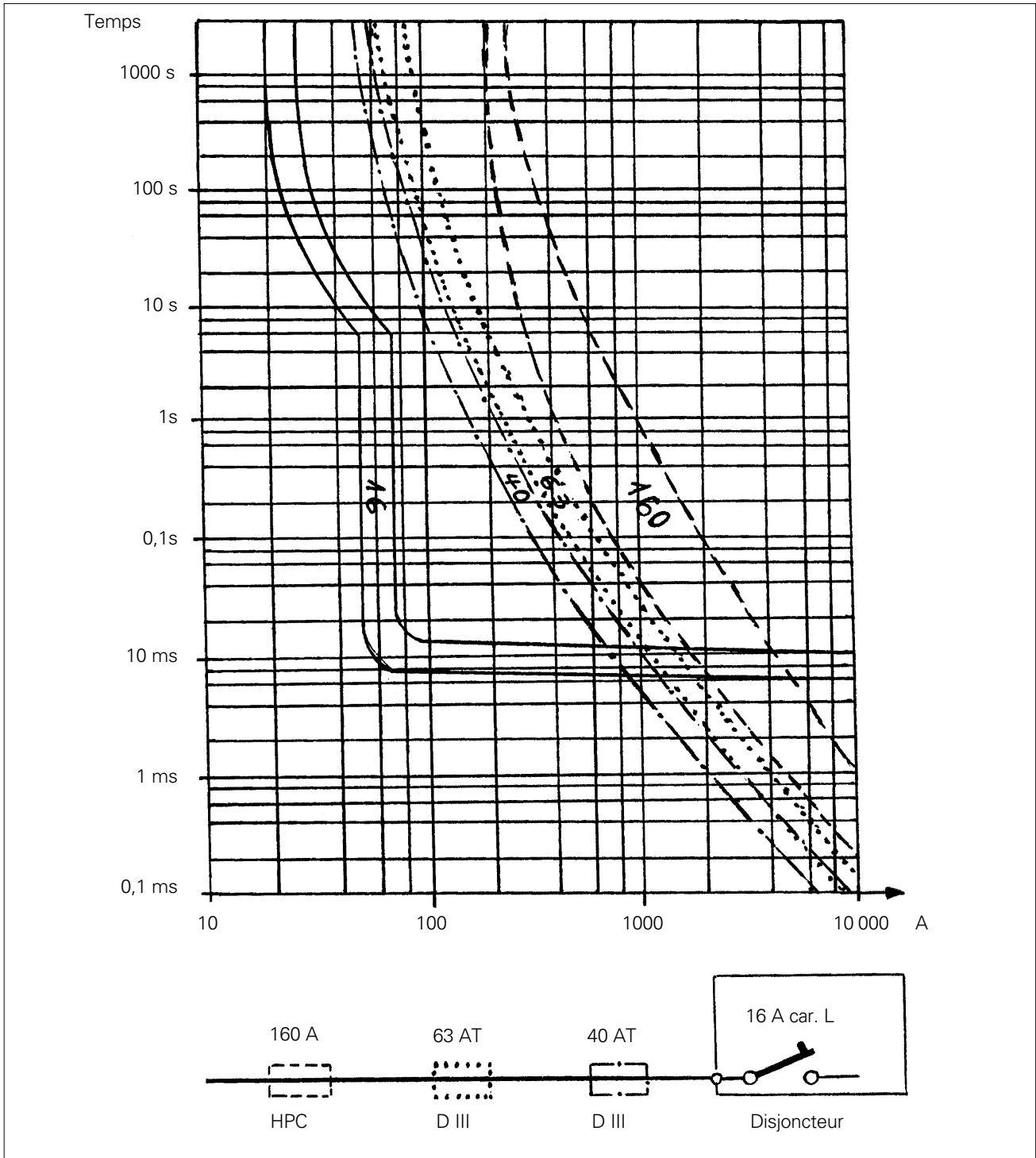


Figure 7.9: Sélectivité entre coupe-surintensité

Les coupe-circuit 40 et 63 AT ne sont pas sélectifs entre 0,1 ms et 4 ms. Les courbes de dispersion se recourent. Les courbes représentent la caractéristique de fusion des cartouches fusibles et de déclenchement du disjoncteur

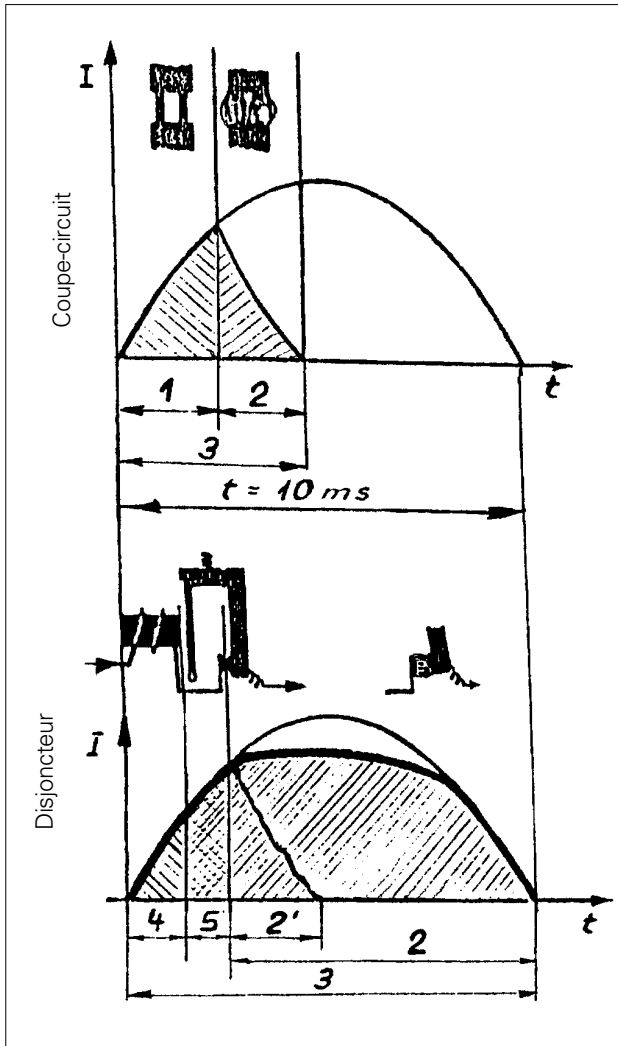


Figure 7.10: Temps de coupure de l'arc

1. Durée de fusion
2. Durée de l'arc
- 2'. Durée de l'arc disjoncteur HPC
3. Durée totale de déclenchement
4. Durée de magnétisation
5. Retard dû au système mécanique

La tension nominale du coupe-surintensité doit être au moins égale à la tension nominale du circuit qu'il protège.

L'intensité nominale de consigne et le degré de retardement des coupe-surintensité doivent être choisis ou réglés de façon :

- qu'ils ne déclenchent ni au cours des démarrages, ni en service normal ;
- qu'en cas de surcharge ils ne déclenchent, autant que possible, que la partie perturbée de l'installation ;
- que l'intensité nominale corresponde à la valeur maximum admissible selon les normes en fonction de la section de la ligne à protéger.

7.4 Protection des machines tournantes

Une machine tournante comme unité de production d'énergie a d'autres critères de protection qu'un moteur. Elle doit assurer la fourniture d'énergie et ne doit se déclencher que si les dispositifs de sécurité entre eux et les consommateurs n'ont pas fonctionné dans les temps de réglage. La durée de surcharge ne doit pas provoquer un échauffement dangereux des isolants.

Les valeurs de consigne de réglage pour la protection sont les courants et les tensions apparents, valeurs données par les instruments.

7.4.1 Surcharge

La protection des alternateurs contre les surcharges ne peut se faire qu'au moyen de relais thermiques. La courbe de déclenchement doit correspondre à celle donnée par le fabricant de l'alternateur.

La protection thermique au moyen de cartouches fusibles n'est pas possible. La sélectivité avec les protections de lignes des consommateurs devient ainsi impossible. Avec un courant nominal égal à celui de l'alternateur, les fusibles ne supportent pas les grands courants d'appel des consommateurs. Une cartouche fusible interrompt le circuit plus rapi-

dement qu'un disjoncteur avec un courant de défaut de même valeur.
 (exemple: I_{cc} 6 fois I_n = fusible 0,4 seconde, disjoncteur 5 secondes)

7.4.2 Surintensité

La protection contre les courts-circuits peut se faire au moyen de cartouches fusibles ou de relais magnétiques avec un seuil de réglage en valeur de courant et en temps de déclenchement. La deuxième solution permet le réglage de la sélectivité par rapport aux protections de lignes des consommateurs.

Pour une marche en parallèle avec le réseau, la protection de l'alternateur doit fonctionner avec un défaut entre l'alternateur et le dispositif de protection. Le courant de court-circuit du réseau traversera inversement le dispositif de protection de l'alternateur.

7.4.3 Marche en parallèle avec le réseau

Les installations de production d'énergie électrique en parallèle avec le réseau doivent être conçues de telle façon qu'en cas de déclenchement du réseau elles se déconnectent automatiquement d'une manière rapide et sûre et qu'elles ne peuvent être réenclenchées que si le réseau est sous tension. Cette condition doit être remplie si l'énergie produite est consommée dans la partie déconnectée.

7.4.4 Traitement du point neutre

Le point neutre des alternateurs asynchrones doit rester isolé par rapport au réseau de distribution comme pour un moteur.

Il est recommandé d'isoler le point neutre des alternateurs synchrones lors de la marche en parallèle avec le réseau. De ce fait, aucun courant d'harmonique de rang 3 ne circule dans les enroulements de l'alternateur. Pour la marche en îlot, le point neutre de la machine doit être relié au réseau de distribution. Il y a lieu de verrouiller l'ouverture du contacteur réseau jusqu'à la position fermée du contacteur du point neutre. Une différence de charge de plus de 33% entre phases peut provoquer une surtension plus grande que 10% dans les circuits monophasés lorsque le point neutre est ouvert.

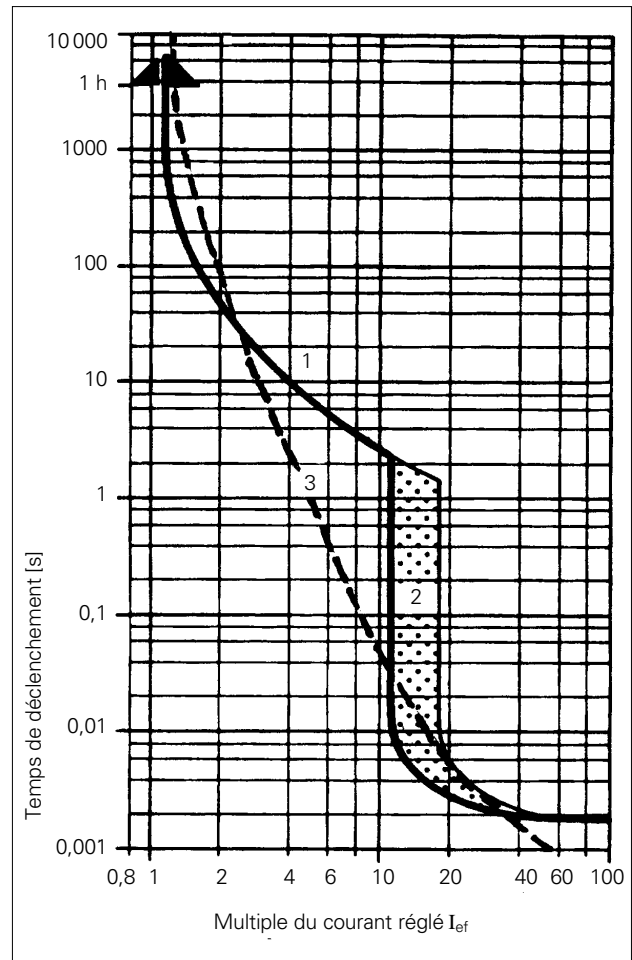


Figure 7.11: Caractéristique de temps/courant
 1. Courant de fonctionnement moyen du déclencheur thermique de surcharge
 2. Courant de fonctionnement moyen du déclencheur magnétique
 3. Courant de fusion moyen de cartouches fusibles.
 Multiple du courant nominal de la cartouche

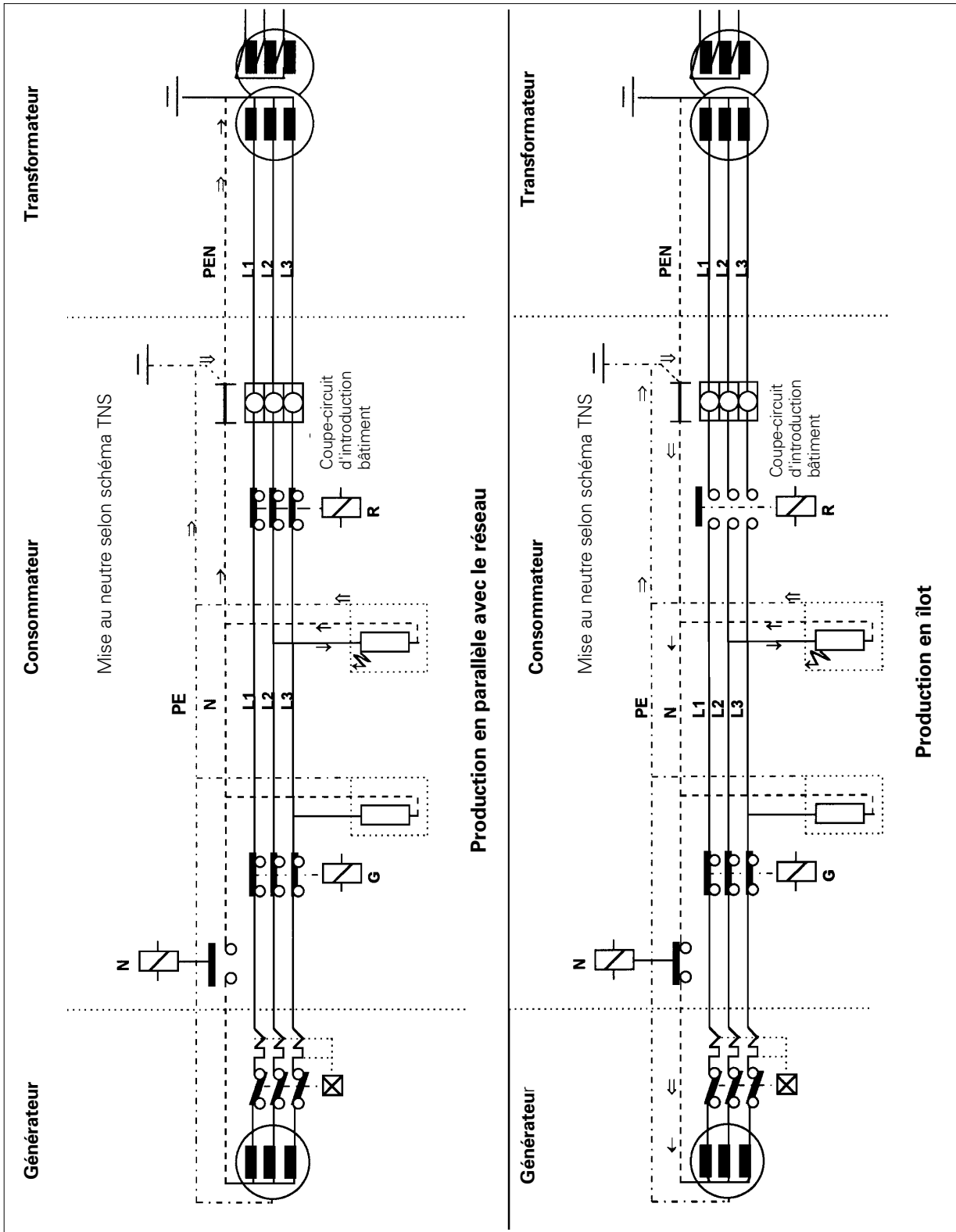


Figure 7.12: Traitement du point neutre

7.4.5 Protection contre les défauts d'isolement

Pour les plus grands alternateurs, une protection différentielle sera installée entre la mesure du courant dans le point neutre et la mesure du courant dans la ligne de l'alternateur au point d'injection. Les critères de choix pour l'installation d'une telle protection sont la valeur de l'alternateur et de l'investissement.

Pour les petits alternateurs asynchrones jusqu'à un courant nominal de 63 A, une surveillance d'isolement peut se faire au moyen d'un disjoncteur de protection à courant de défaut avec un courant nominal de déclenchement par défaut de 300 mA. Lors d'un défaut d'isolement entre le disjoncteur à courant de défaut et le point neutre de l'alternateur, un courant circule entre le défaut et le point neutre du transformateur pour se fermer par les autres phases (figure 7.13).

7.4.6 Réglage de tension (type de régulateur)

Alternateurs asynchrones

La commande et la surveillance des alternateurs asynchrones sont simples. Elles n'exigent aucun régulateur de vitesse, ni de tension. La vitesse synchrone pour le raccordement sur le réseau peut être fixée au moyen d'une position d'arrêt temporaire sur le limiteur d'ouverture au démarrage de la vanne ou du pointeau. Le régulateur de puissance agit sur le limiteur d'ouverture de la vanne ou du pointeau en fonction du niveau d'eau. Lors d'une coupure du réseau, si la machine n'est pas surcompensée, elle ne peut plus fournir d'énergie sur le réseau et elle part en survitesse. La tension aux bornes de l'alternateur varie et elle est donnée par le réseau.

Alternateurs synchrones

La commande et la surveillance des alternateurs synchrones exigent un régulateur de vitesse et de tension, ainsi qu'un appareil de synchronisation pour le raccordement sur le réseau. La tension du réseau varie de $\pm 10\%$ et le réglage de la tension pour les alternateurs synchrones doit se faire sur l'angle de déphasage du courant sur la tension

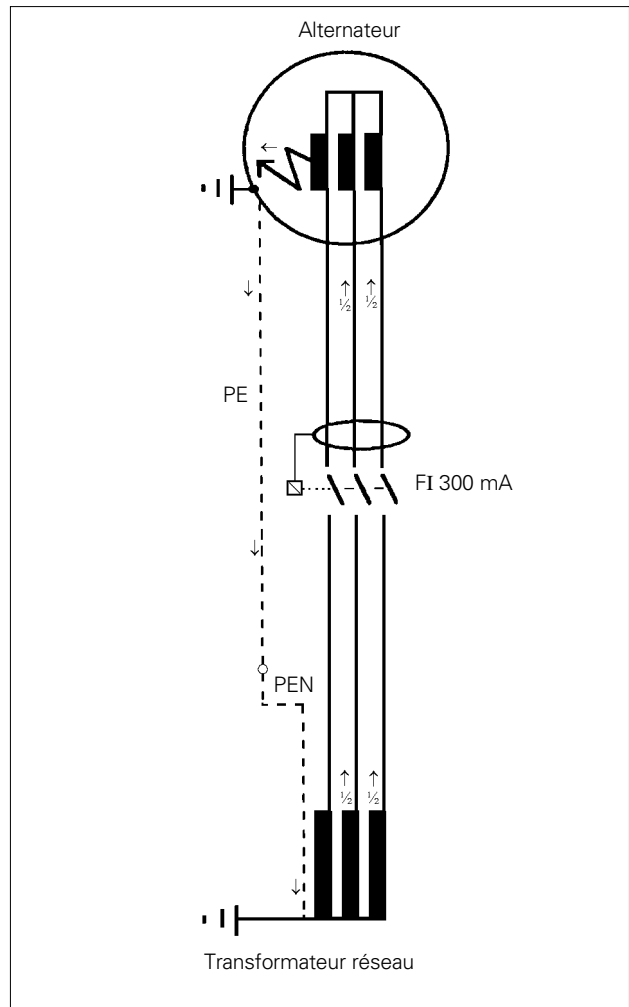


Figure 7.13: Protection contre les défauts d'isolement par FI

($\cos \varphi$). A défaut d'un tel régulateur, les variations de tension du réseau peuvent provoquer des surintensités sur les machines par courants capacitifs ou inductifs. Ce type d'alternateur est choisi en règle générale pour une marche en îlot.

7.4.7 Liaisons équipotentielles

Toutes les parties métalliques conductrices doivent être reliées au conducteur principal d'équipotentialité du bâtiment. Pour éviter des brûlures par arc sur les paliers, une liaison équipotentielle doit être établie entre la conduite forcée avant la vanne d'entrée, la turbine et l'alternateur. Ces liaisons doivent être posées de manière telle que, lors des révisions de la vanne et de la turbine, elles restent en place et elles assurent leur fonction de protection pour les personnes.

7.4.8 Protection atmosphérique

Les distances, les isolations et les dispositifs de protection contre les surtensions d'une installation doivent être conçus selon les règles techniques reconnues de sorte que les effets de surtensions d'origine interne ou externe n'engendrent ni risque ni dommage.

7.4.9 Liste des appareils de commande, de protection et de lecture

Alternateur Puissance	Asynchrone 1 à 500 kVA	Synchrone 1 à 500 kVA	Synchrone plus de 500 kVA
Régulateur			
Régulateur de vitesse	non	oui	oui
Régulateur de tension en fonction du $\cos \varphi$	non	oui	oui
Régulateur de charge en fonction du niveau d'eau	oui	oui	oui
Synchrotact automatique	non	oui	oui
Relais de protection			
Surcharge I_{th}	oui	oui	oui
Surintensité I_{cc}	oui	oui	oui
Max. et min. tension	oui	oui	oui
Max. et min. fréquence Hz	oui	oui	oui
Relais retour d'énergie	oui	oui	oui
Différentiel	non	à choix	oui
Terre rotorique	non	à choix	oui
Relais min. impédance	oui	oui	oui
Relais de protection min. d'excitation	non	à choix	oui
Survitesse mécanique	à choix	à choix	oui
Instruments			
Ampèremètre générateur	oui	oui	oui
Voltmètre générateur	oui	oui	oui
Voltmètre réseau	non	oui	oui
Wattmètre	à choix	à choix	oui
Varmètre	à choix	à choix	oui
Fréquencemètre	non	oui	oui
Cos φ -mètre	à choix	oui	oui
Compteur d'énergie active	oui	oui	oui
Compteur d'énergie réactive	à choix	à choix	oui
Synchroscope	non	oui	oui
Voltmètre différentiel	non	oui	oui
Fréquencemètre différentiel	non	oui	oui
Ampèremètre excitation	non	à choix	oui
Voltmètre excitation	non	à choix	oui
Limiteur d'ouverture de charge	non	non	oui

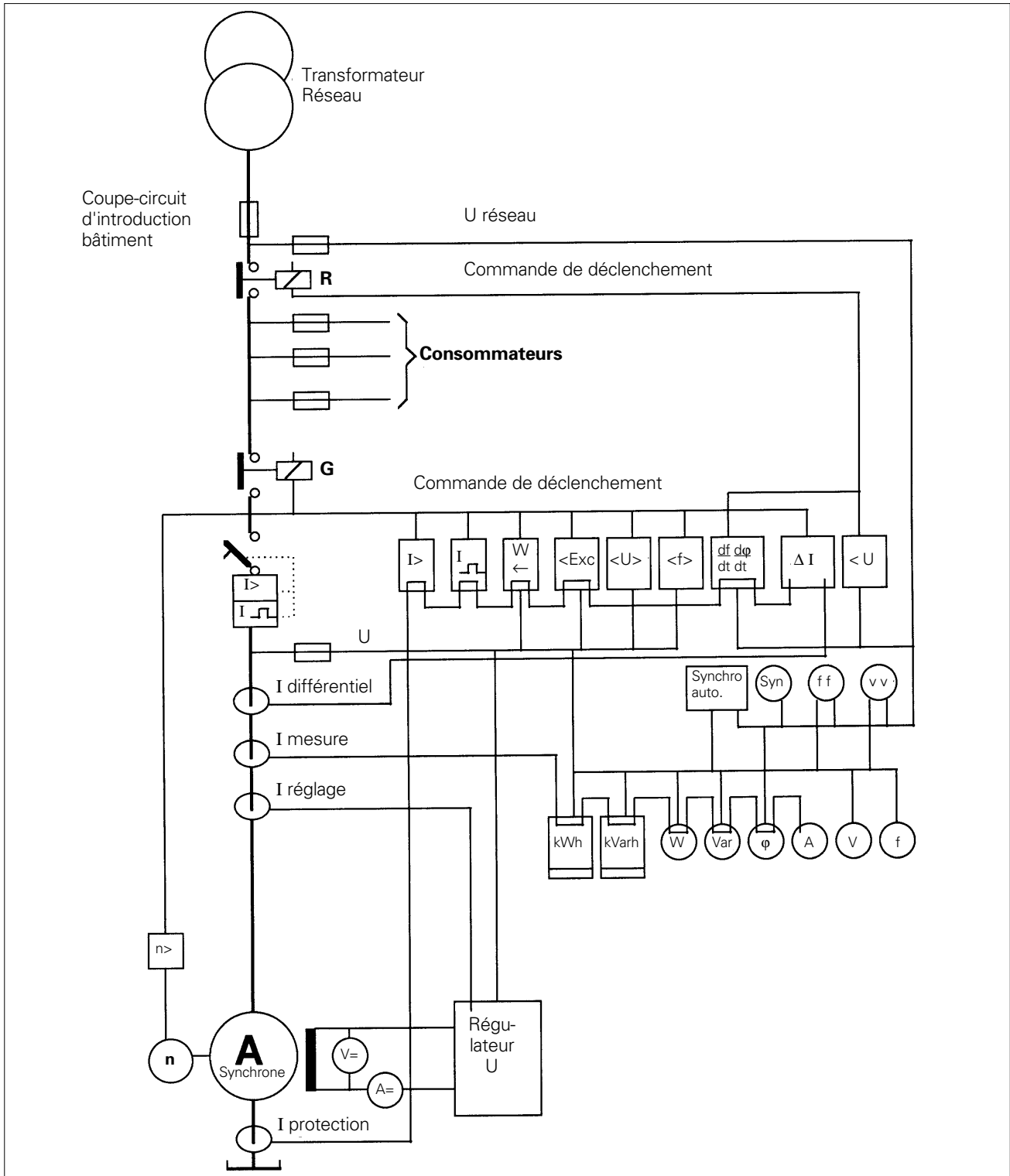


Figure 7.14: Protection de l'alternateur

7.4.10 Liste des dispositifs donnant un arrêt d'urgence

Alternateur Puissance	Asynchrone 1 à 500 kVA	Synchrone 1 à 500 kVA	Synchrone Plus de 500 kVA
Arrêt d'urgence			
*Manuel	oui	oui	oui
Survitesse	oui	oui	oui
Niveau eau minimum	oui	oui	oui
Fermeture accidentelle de la vanne	non	non	oui
Température huile turbine trop haute	–	–	oui
Niveau huile turbine minimum	–	–	oui
Défaut pression d'huile turbine	–	–	oui
*Différentiel	–	à choix	oui
*Surcharge thermique	oui	oui	oui
*Surintensité I_{cc}	oui	oui	oui
*Tension min. et max.	oui	oui	oui
*Impédance minimum	oui	oui	oui
*Retour d'énergie	oui	oui	oui
*Terre rotorique	non	à choix	oui
*Défaut d'excitation	non	oui	oui
*Courant d'excitation trop élevé	non	à choix	oui
Température enroul. stator trop haute	à choix	à choix	oui
Température air de refroid. trop haute	à choix	à choix	oui
Niveau d'eau à la centrale trop haut	à choix	à choix	oui
Déclenchement CO ₂ manuel	à choix	à choix	oui
Manque de tension de commande	oui	oui	oui
Température paliers trop haute	à choix	à choix	oui

* Arrêt d'urgence avec déclenchement de l'alternateur du réseau

Chaque arrêt d'urgence entraîne la mise en hors-service du groupe turbogénérateur. Les arrêts d'urgence se classent en deux catégories :

1. Avec déclenchement de l'alternateur du réseau et mise en service du déflecteur/vanne de sécurité.
2. Fermeture du pointeau ou du distributeur de la turbine, déclenchement de l'alternateur du réseau à la position de la vanne pour la synchronisation. Avec cette action on évite des survitesses.

7.5 Obligations juridiques

7.5.1 Obligation de présenter un projet

On distingue entre:

Devoir d'annonce / contrôle initial



Même si la production d'énergie est faite sous une tension de 230 ou de 400 V et qu'elle est injectée dans une installation intérieure avec une tension maximum admissible, les installations de production d'énergie ne sont pas toutes soumises aux mêmes critères. Selon le potentiel de mise en danger ou de dérangement de telles installations, on appliquera divers critères de prescriptions pour l'exécution, la modification, l'entretien et le contrôle.

et

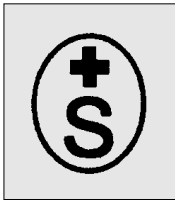
Contrôles périodiques



Voir paragraphe 7.5.6 Contrôles périodiques

<p>Fonctionnement en parallèle avec le réseau Puissance maximum triphasée plus petite que ≤ 10 kVA ou $\leq 3,3$ kVA monophasée</p>	<ul style="list-style-type: none"> – sont assimilées aux installations électriques intérieures (NIBT) – ne sont pas soumises à l’obligation de présenter un projet si elles se trouvent sur la propriété de l’exploitant (OPIC) – sont soumises à la justification selon Ordonnance sur les matériels électriques à basse tension (OMBT) – requièrent une autorisation de raccordement de distributeur d’énergie – le distributeur d’énergie est l’entreprise astreinte aux contrôles OIBT
<p>Fonctionnement en parallèle avec le réseau Puissance maximum triphasée plus grande que > 10 kVA ou $> 3,3$ kVA monophasée</p>	<ul style="list-style-type: none"> – ne sont pas assimilées aux installations électriques intérieures (OIBT) – sont soumises à l’obligation de présenter un projet (OPIC) (l’émolument dépend de la valeur de l’installation (OIFICF)) – sont soumises à la justification selon Ordonnance sur les matériels électriques à basse tension (OMBT) – requièrent une autorisation de raccordement de distributeur d’énergie – le distributeur d’énergie est l’entreprise astreinte aux contrôles (OIBT)
<p>Toutes les installations de production en parallèle avec le réseau</p>	<p>Les installations de production d’énergie électrique en parallèle avec un réseau doivent être conçues de telle façon qu’en cas de déclenchement du réseau elles se déconnectent automatiquement d’une manière rapide et sûre et qu’elles ne peuvent être réenclenchées que si le réseau est sous tension. Il y a lieu de porter une attention particulière à la construction des machines de production ou de transformation d’énergie afin que les perturbations produites restent dans des valeurs admissibles. Les conditions de protection et de mise au neutre doivent être remplies.</p> <p>Le raccordement sur le réseau de distribution requiert une autorisation de raccordement et d’exploitation du distributeur. Les conditions de raccordement et d’exploitation, ainsi que les contrôles périodiques sont pris en commun accord sur la base de règlements du distributeur.</p> <p>Il existe un contrat type qui peut être obtenu auprès du Département fédéral des transports et communication et de l’énergie, 3003 Berne</p>
<p>Installations fonctionnant en îlot sans raccordement avec un réseau de distribution</p>	<ul style="list-style-type: none"> – doivent être annoncées par leur exploitant à l’Inspection fédérale des installations à courant fort (sans émolument) – ne sont pas soumises à l’obligation de présenter un projet (OPIC) – sont soumises à la justification selon l’Ordonnance sur les matériels électriques à basse tension (OMBT) – l’exploitant est l’entreprise astreinte aux contrôles (OIBT)

7.5.2 Définitions

<p>Obligation de présenter un projet</p>	<p>On doit soumettre un projet à l'IFICF comprenant tous les documents en double qui sont nécessaires pour établir un jugement.</p> <p>Entre autres:</p> <ul style="list-style-type: none"> - formulaire installation de production d'énergie (à demander à l'IFICF); - lieu et emplacement de la nouvelle installation ainsi que les liaisons avec les installations existantes; - toutes les dispositions de sécurité en relation avec la marche en parallèle; - influences probables avec ou par d'autres installations existantes; - autorisations ou accords écrits. <p><i>Les travaux ne peuvent être entrepris que lorsque le requérant est en possession de l'approbation du projet</i></p>
<p>Astreint aux contrôles</p>	<p>Astreint aux contrôles se rapporte à toute l'installation, y compris les consommateurs raccordés à l'installation de production.</p> <p>Pour les installations de production en îlot, c'est l'exploitant qui est responsable de l'exécution du contrôle de sécurité de ces installations. Il doit pouvoir se justifier auprès de l'IFICF.</p> <p>Des contrôles de vérification peuvent être entrepris par l'IFICF (avec émoluments) (LIE et OIFICF).</p>
<p>Soumis à la justification</p> <div data-bbox="236 1417 411 1615" style="text-align: center;">  </div> <p>Signe distinctif suisse de sécurité</p>	<p>Ce sont les appareils qui sont soumis à la justification et cette dernière est comprise dans l'obligation de contrôle. Pour les installations de production, la justification doit montrer que celles-ci ne peuvent mettre en danger ni les personnes ni les choses et qu'elles ne perturbent pas d'autres installations. Ceci peut être justifié par un certificat d'une station d'essais reconnue.</p> <p>Certains matériels sont soumis au régime de l'approbation. Le matériel approuvé doit porter le signe distinctif de sécurité (OMTB).</p>

7.5.3 Critères d'augmentation du danger par une installation de production d'énergie

- Augmentation de la puissance de court-circuit au point de raccordement et dans l'installation de distribution raccordée.
- Augmentation de l'effet dynamique dans l'installation de distribution en cas de court-circuit.
- Augmentation de la tension au point de raccordement et dans l'installation selon la chute de tension dans la ligne d'alimentation de l'installation à laquelle elle est raccordée.
- Selon le traitement du point neutre, de forts courants d'harmoniques de rang 3 peuvent circuler dans le conducteur neutre et augmenter les échauffements de l'alternateur et du conducteur neutre.
- Surtension monophasée de plus de 10% en cas d'ouverture des conducteurs polaires en liaison avec le transformateur avant la fermeture du conducteur neutre, en cas de charge non équilibrée plus grande que 33%.

7.5.4 Personnes autorisées à installer

Seules les personnes qui sont au bénéfice d'une autorisation d'installer du distributeur sont autorisées à raccorder les installations de production d'énergie avec marche en parallèle sur le réseau (art. 8 de l'OIBT).

Sont autorisées à installer des installations de production d'énergie électrique en îlot et des installations aux consommateurs les personnes qui remplissent les conditions d'homme de métier dans le sens de l'art. 9, chiffre 3 de l'OIBT.

7.5.5 Personnes autorisées à contrôler

Pour les contrôles périodiques, seules des personnes autorisées au sens de l'art. 32 de l'OIBT peuvent être chargées de ce travail.

7.5.6 Contrôles périodiques

Les installations électriques doivent être contrôlées à des intervalles de temps réguliers selon l'art. 34 de l'OIBT. Ce contrôle se rapporte à l'ensemble des installations basse tension (production et consommation). La périodicité des contrôles dépend du genre d'installation de consommation et ils doivent être effectués, selon la catégorie, tous les 1, 5, 10 ou 20 ans.

Bibliographie

- **Traité d'Electricité**, J. Chatelain, vol. X, Edition Georgi Lausanne, 1983
- **Electrotechnique, transformateurs, moteurs électriques**, R. Merat, R. Moreau, J.-P. Dubos, J. Lafargue, R. le Goff, Edition Nathan Paris, 1994
- **Electrotechnique, lois générales et machines**, M. Jeanrenaud, Edition Spès Dunod Lausanne, 1973
- **Electrotechnique et machines électriques**, B. Saint-Jean, Edition Eyrolles Paris, 1976
- **Electrotechnique et machines électriques**, J. Niard, R. Moreau, Edition Nathan Technique Paris, 1984
- **Electricité appliquée Exercices**, A. Bory, J. Lafargue, Edition Nathan Paris, 1994
- **Electricité**, courant continu, courant alternatif, R. Merat, R. Moreau, L. Allay, J.-P. Dubos, J. Lafargue, R. le Goff, Edition Nathan Paris, 1991
- **Comportement d'une génératrice asynchrone triphasée sur une charge monophasée**, Ratovoharisoa, Rapport interne EPFL/LEME, Lausanne, 1991
- **CEI 34 (Commission Electrotechnique Internationale) :**
Machines électriques tournantes
34-1 : Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement
34-5 : Classification des degrés de protection procurés par les enveloppes
34-7 : Symboles pour les formes de construction et les dispositions de montage
34-8 : Marques d'extrémités et sens de rotation des machines tournantes
- **Moteurs asynchrones triphasés : Connaissances de base et dimensionnement**
BBC-Normelec - 1986 - VNM-8610-1500F-CBM
- **Manual on induction motors used as generators**, J.-M. Chapallaz, J. Dos Ghali, P. Eichenberger, G. Fischer, MHPG Series - Harnessing Water Power on a Small Scale - Volume 10 - Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – Gate – Vieweg 1992
- **Charge adaptative**, J.-P. Ludwig, J. Dos Ghali, L. Cardoletti, Rapport interne EPFL/LEME, 1990

Associations de soutien

ACS	Association des communes suisses
ADER	Association pour le développement des énergies renouvelables
ADUR	Association des usiniers romands
ARPEA	Association romande pour la protection des eaux et de l'air
ASE/ETG	Société pour les techniques de l'énergie de l'ASE
ASPEE	Association suisse des professionnels de l'épuration des eaux
INFOENERGIE	Centre de conseils
OFEL	Office d'électricité de la Suisse romande
PROMES	Association des professionnels romands de l'énergie solaire
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SMSR	Société des meuniers de la Suisse romande
SSIGE	Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux
UCS	Union des centrales suisses d'électricité
UTS	Union technique suisse
UVS	Union des villes suisses