

# ÉLECTRICITÉ

## Le Calcul Pratique des Courants de Court-circuit entre Phases<sup>(1)</sup>

Il n'est pas possible en général de s'opposer à l'apparition des surintensités provoquées dans les réseaux par le court-circuit brusque ; les dispositifs de protection ne peuvent qu'en limiter la durée. Aussi convient-il de savoir calculer exactement ce que l'on ne peut éviter, tant pour s'assurer de la sécurité des installations existantes (disjoncteurs, jeux de barre, réducteurs), que pour déterminer les modifications à apporter lors du développement des interconnexions qui accroissent les surintensités en chaque point du système.

Le calcul des courants de court-circuit était considéré jusqu'à ces derniers temps comme assez imprécis. Les méthodes mises au point ces dernières années permettent actuellement un calcul assez exact ; nous en développons ici la méthode et les applications les plus usuelles.

### PREMIÈRE PARTIE

#### Méthode de calcul

CHAPITRE I. — *Etude du régime variable lors de la mise en c.c. brusque d'un alternateur.*

1. — Généralités. — Position du problème.
2. — Cas limite du court-circuit sur réseau infini.
  - a) Nature du phénomène ;
  - b) Courant permanent ;
  - c) Courant instantané maximum ;
  - d) Courant efficace total.
3. — Court-circuit franc d'un alternateur à vide.
  - a) Nature du phénomène ;
  - b) Les réactances de court-circuit ;
  - c) Courant instantané maximum. Courant efficace total. Sa variation en fonction du temps ;
  - d) Puissance apparente de court-circuit .
4. — Court-circuit sur réactance d'un alternateur à vide.
  - a) Courant instantané ;
  - b) Courant permanent.
5. — Court-circuit franc d'un alternateur en charge.
  - a) Particularités du problème ;
  - b) Courant instantané ;
  - c) Courant permanent ;
  - d) Schéma équivalent ;
  - e) Remarque sur le rôle du régulateur d'excitation.
6. — Court-circuit sur réactance d'un alternateur en charge.

7. — Conclusion.
8. — Court-circuit alimenté par deux centrales.
9. — Réseau constitué par un nombre quelconque de centres générateurs et récepteurs formant un système non bouclé.  
Note annexe sur les équations de l'alternateur synchrone.

CHAPITRE II. — *Impédances équivalentes.*

1. — Schémas équivalents des éléments d'un réseau.
2. — Réduction des impédances à une même tension de base.
3. — Réduction d'un système complexe d'impédances.

CHAPITRE III. — *Conduite des calculs pour le calcul du courant de c.c. triphasé d'un réseau.*

CHAPITRE IV. — *Courant de court-circuit entre deux phases.*

1. — Etude du régime variable lors de la mise en c.c. brusque entre 2 phases.
2. — Impédances inverses des éléments d'un réseau.
3. — Réduction des impédances. Conduite des calculs.
4. — Applications numériques.
5. — Court-circuit alimenté par deux alternateurs.

### DEUXIÈME PARTIE

#### Applications

CHAPITRE I. — *Problèmes pratiques nécessitant le calcul du courant de c.c. entre phases.*

1. — Généralités.
2. — Contraintes mécaniques.
3. — Contraintes thermiques.
4. — Appareils d'interruption. — Disjoncteurs, Fusibles.

CHAPITRE II. — *Les applications usuelles.*

1. — Généralités.
2. — Calcul du courant de court-circuit aux barres d'une centrale.
3. — Court-circuit de feeder. Réactances de protection.
4. — Court-circuit en un point quelconque d'un réseau alimenté par une centrale.

(1) D'après Jeumont — Janvier-Mars 1935.

5. — Court-circuit dans un réseau alimenté par une centrale et un feeder d'interconnexion.
6. — Court-circuit dans un réseau non bouclé alimenté par un nombre quelconque de centrales.
7. — Emploi d'une impédance de liaison entre 2 centres générateurs pour la limitation des courants de c.c.

## PREMIÈRE PARTIE

### Méthode de calcul

#### CHAPITRE I.

*Etude du régime variable lors de la mise en court-circuit d'un alternateur.*

#### I. — GENERALITES. — POSITION DU PROBLEME

Nous nous proposons d'étudier la variation du courant efficace en fonction du temps, en prenant pour origine des temps l'instant de l'établissement du court-circuit.

L'allure générale de la variation du courant efficace pour un court-circuit établi à l'instant  $t = 0$  est celle de *figure 1*.

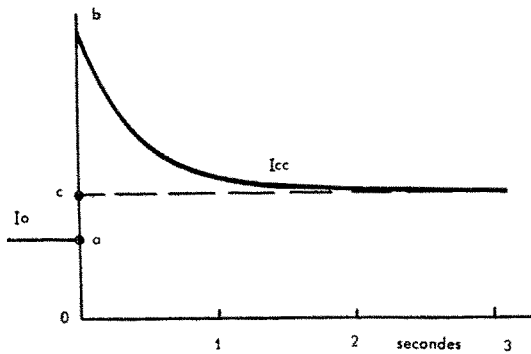


Fig. 1.

Le courant passe de la valeur initiale  $I_0 = oa$  à la valeur  $I_{cc} = ob$  en un temps qui est de l'ordre du centième de seconde. Il tend vers la valeur constante  $I_{cc} = oc$  qui est pratiquement atteinte après 2 à 3 secondes.

L'objet de notre étude est de prédéterminer la courbe ci-dessus en fonction des différentes constantes caractéristiques de la machine.

#### 2. — CAS LIMITE DU COURT-CIRCUIT SUR RESEAU INFINI

Nous examinerons d'abord ce cas limite, qui conduit à des relations simples et met en évidence quelques-unes des particularités du problème.

##### a) Nature du phénomène.

Le courant instantané dans l'impédance (*fig. 2*) doit être regardé comme la somme de deux composantes :



Fig. 2.

- 1° un courant sinusoïdal de valeur  $\frac{U}{Z_e}$  (courant de régime) ;
- 2° un courant exponentiel décroissant (phénomène transitoire).

La valeur instantanée initiale du second terme dépend de la valeur instantanée de la tension  $U$  à l'instant où le c.c. se produit. Elle est comprise, selon l'instant, entre 0 et une valeur égale à l'amplitude de la composante alternative.

Considérons l'oscillogramme donnant la variation instantanée du courant à partir de l'instant de la mise en c.c. (*fig. 3*). Traçons l'enveloppe des maxima et des minima. Le milieu du segment d'ordonnée compris entre ces

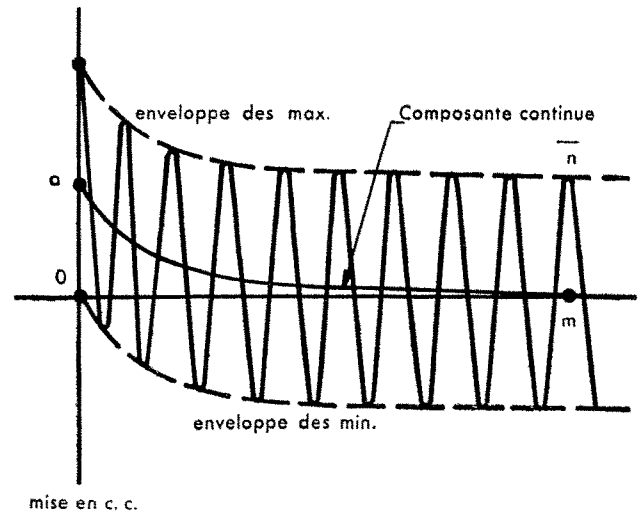


Fig. 3.

deux enveloppes définit une courbe exponentielle qui est la composante continue. L'ordonnée à l'origine  $oa$  est au plus égale à l'amplitude  $mn$ . Lorsque  $oa = 0$  on dit que le c.c. est symétrique.

##### b) Courant permanent.

$$I_{cc} = \frac{U}{R_e + jX_e}$$

Si l'on peut négliger  $R_e$  devant  $X_e$  :

$$I_{cc} = \frac{U}{X_e} \quad (1)$$

Une réactance est définie par la valeur de la chute de tension réactive, à son courant normal  $I_n$ , rapportée à la tension normale.

$$\frac{S_e}{100} = \frac{X_e I_n}{U} \quad (2)$$

On dira plus simplement : une réactance de  $S_e$  pour cent. Il résulte de (1) et (2) la relation usuelle très simple :

$$\frac{I_{cc}}{I_n} = \frac{100}{S_e}$$

##### c) Courant instantané maximum.

La valeur maximum possible du courant instantané est, d'après ce qui précède :

$$2 \frac{U \sqrt{2}}{\sqrt{R_e^2 + X_e^2}}$$

soit en négligeant  $R_e$  devant  $X_e$  :

$$2 \sqrt{2} \frac{100}{S_e} I_n$$

*Remarque.*

Le facteur 2 des deux dernières relations est exagéré car l'amplitude maximum est  $ps$  (*fig. 4*), avec  $qs = oa$  et  $pq = 0,8 oa$  environ du fait de la décroissance rapide de la composante continue.

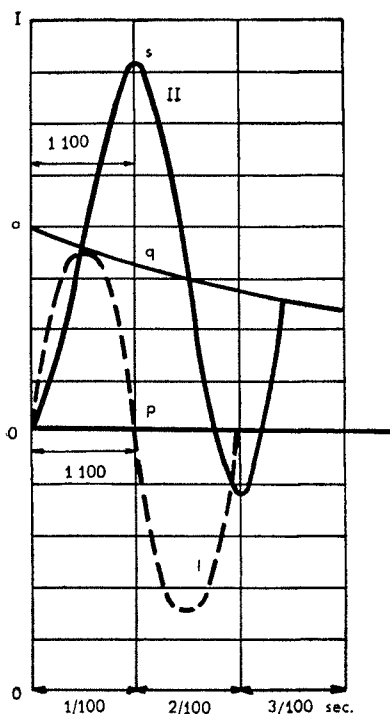


Fig. 4.

Courbe I : Courant de c. c. symétrique.  
 Courbe II : Courant de c. c. dissymétrique avec  
 composante continue maximum.

On aura donc :  $ps = 1,8 oa$

et le facteur 2 sera remplacé par 1,8.

L'amplitude maximum de la première demi-onde est de  $1,8 \times \sqrt{2} I_{cc}$  soit  $2,5 I_{cc}$

La première demi-onde correspond à une durée de 1/100 de seconde (à 50 périodes) avec c.c. symétrique (courbe pointillée fig. 4).

Dans le cas du c.c. le plus dissymétrique, la première demi-onde correspond à une durée de 2/100 de seconde environ. Sa valeur efficace est :

$$\sqrt{\overline{pq^2} + \left(\frac{qs}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

soit 1,6 fois la valeur efficace de la composante alternative pour  $pq = 0,8 oa$ .

(On aurait  $\sqrt{3}$  au lieu de 1,6 pour  $pq = oa$ , c'est-à-dire en négligeant la décroissance de la composante continue).

La courbe du courant efficace total est représentée figure 5.

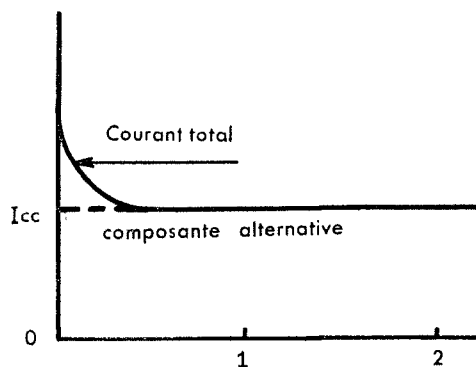


Fig. 5.

Elle se confond après quelques dixièmes de seconde avec celle de la seule composante alternative.

### 3. — COURT-CIRCUIT FRANC AUX BORNES D'UN ALTERNATEUR A VIDE (fig. 6).

#### a) Nature du phénomène.

Pour l'étude du régime variable, il importe de tenir compte de ce que l'alternateur comporte, outre les circuits inducteur et induit, un circuit amortisseur qui est parcouru par

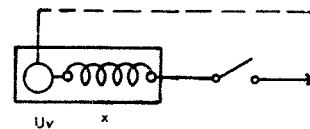


Fig. 6.

un courant pendant la durée du régime variable.

Au régime variable dans l'induit (qui seul nous intéresse ici) correspondent un régime variable dans l'inducteur et un autre dans l'amortisseur (1).

Le courant instantané dans l'induit doit être regardé comme la somme de deux composantes :

1°) un courant sinusoïdal *amorti* : l'amplitude des ondes successives décroissant très rapidement pendant les quelques premières périodes, puis plus lentement, et tendant enfin vers une valeur constante (composante alternative).

2°) un courant exponentiel décroissant dont la valeur initiale dépend de la valeur instantanée de la tension U, à l'instant où le court-circuit se produit (composante continue).

Pour séparer ces deux composantes à partir d'un oscillogramme (voir fig. 30), on trace l'enveloppe des maxima positifs et négatifs; et l'ordonnée moyenne obtenue en divisant par deux le segment d'ordonnée compris entre les deux enveloppes. Cette ordonnée moyenne mesurée à partir de l'axe des temps est la *composante continue*. Elle décroît suivant une loi exponentielle et s'annule en général après 2 à 3 dixièmes de seconde.

L'ordonnée de la courbe du courant total, mesurée à partir de la composante continue, est la *composante alternative*.

Pendant la durée du régime transitoire, la composante alternative part d'une certaine valeur initiale, et décroît suivant une loi exponentielle, pour atteindre une valeur finale de régime.

A l'instant initial, le flux (2) n'ayant pas varié dans le circuit magnétique entre l'instant qui précède et celui qui suit la mise en c.c., l'accroissement très brusque du courant dans l'induit se trouve automatiquement compensé par les surintensités dans l'inducteur et dans l'amortisseur qui s'opposent à toute action démagnétisante. Si  $U_v$  représente la tension à circuit ouvert avant mise en c.c., on peut écrire :

$$I_{cc} \text{ initial} = \frac{U_v}{\omega L}$$

Nous désignerons cette valeur par  $I_1^{00}$ .

(1) Lors de la mise en c. c. de l'induit, le courant dans l'inducteur augmente brusquement à partir de sa valeur actuelle et reprend progressivement cette valeur suivant une loi exponentielle. De même le courant dans l'amortisseur augmente brusquement à partir de zéro et s'annule ensuite suivant une loi exponentielle.

(2) On sait en effet que le flux ne peut varier brusquement dans un circuit magnétique ; au contraire un courant peut varier presque instantanément dans un conducteur, lorsque l'effet de self induction est compensé par un effet d'induction mutuelle.

La réactance  $x_f$  définie par cette relation, n'est pas la simple réactance de fuites de l'induit, puisque l'inducteur et l'amortisseur interviennent dans le phénomène. Elle est un peu plus élevée que celle de l'induit seul.

Après quelques périodes, le courant dans l'amortisseur a pratiquement disparu, et la réactance résultante est accrue; sa valeur étant représentée par  $x'_f$ , on aura :

$$I_{cc} \text{ après } q. q. \text{ périodes} = \frac{U_v}{x'_f}$$

Nous désignerons cette valeur par  $I_2^{cc}$ .

Après quelques secondes, l'effet démagnétisant de la réaction d'induit atteint sa pleine valeur, et le courant prend la valeur finale de régime :

$$I_{cc} \text{ permanent} = \frac{U_v}{X}$$

Nous désignerons cette valeur par  $I_3^{cc}$ .

b) *Les réactances de court-circuit.*

En conclusion, la réactance  $x$  par laquelle il faut diviser la tension à vide pour avoir la composante alternative du courant de c.c. n'est pas constante ; elle varie avec l'instant considéré. Sa valeur est :  $x_f$  à l'instant initial (réactance dite subtransitoire) ;  $x'_f$  après quelques périodes (réactance dite transitoire) ;

$X$  en régime permanent (réactance dite synchrone).

La machine sera représentée par le schéma équivalent de la figure 6.

Les valeurs des réactances de court-circuit pour les machines usuelles sont les suivantes :

TABEAU DES RÉACTANCES DE COURT-CIRCUIT :

GENRE DE MACHINE	Subtransitoire $S_f$	Transitoire $S'_f$	Synchrone $S$
Turbo-alternateur	12	19	220
Alternateur hydraulique:			
avec amortisseur	22	33	120
sans amortisseur	30	35	120
Compensateur synchrone	25	37	185

Ces valeurs sont données en pour cent ; en les multipliant par  $\frac{U_v}{I_n}$ , on obtiendra la réactance en ohms. En désignant par  $x$  la réactance en ohms et  $s$  la réactance en pour cent, on passera de l'une à l'autre par la relation :

$$\frac{s}{100} = \frac{x I_n}{U_v}$$

Il résulte de cette relation que le rapport du courant de c.c. au courant normal peut s'exprimer directement sous la forme simple :

$$\frac{I_{cc}}{I \text{ normal}} = \frac{100}{s}$$

$s$  prenant selon l'instant considéré la valeur  $S_f, S'_f$  ou  $S$ .

Le rapport de la valeur efficace de la composante alternative du courant de c.c., au courant normal, sera donné par le tableau suivant :

GENRE DE MACHINE	REGIME		
	initial	après q. q. pér.	permanent (1)
Turbo-alternateur	8,3	5,3	0,55
Alternateur hydraulique	4,5	3	1
Compensateur	4	2,7	0,65

(1) Nous avons indiqué dans cette colonne une valeur de 20 pour cent supérieure à celle qui résulte de la relation  $\frac{100}{S}$ , cette majoration tenant compte d'une saturation normale de l'alternateur (voir la note annexe).

#### DÉTERMINATION DES RÉACTANCES DE COURT-CIRCUIT A PARTIR DES ESSAIS ET DU CALCUL.

a) *à partir des essais :*

Les réactances subtransitoire et transitoire se déterminent à l'aide de mesures qui demandent une assez grande précision et qui ne font pas habituellement l'objet d'essais de réception en usine.

Pour des machines de conception courante, les valeurs du tableau ci-dessus peuvent être adoptées en moyenne sans erreur importante. La réactance synchrone est plus variable d'une machine à l'autre; plutôt que d'adopter une valeur moyenne normale, il convient de la déduire directement des caractéristiques à vide et en court-circuit triphasé tracées en fonction du courant d'excitation (fig. 7).

$$X = \frac{OM}{ON}$$

OM étant lu sur la partie droite de la caractéristique à vide, et ON sur la caractéristique en court-circuit pour la même abscisse.

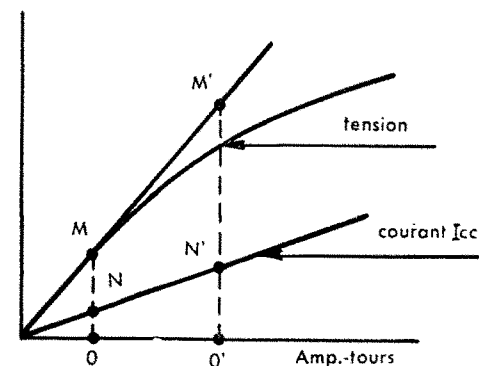


Fig. 7.

b) *à partir du calcul :*

Les réactances subtransitoire et transitoire se calculent par des méthodes assez délicates.

La réactance synchrone est une fonction du rapport des ampères-tours d'excitation pour la tension normale à vide, aux ampères-tours d'excitation de pleine charge (voir annexe).

c) *Courant instantané maximum et courant efficace total.*

La valeur maximum de la composante continue peut, si le c.c. se produit à l'instant le plus défavorable de l'onde de tension, évaluer l'amplitude de la composante alternative initiale, soit :

$$1,8 \sqrt{2} \frac{U_v}{x_f}$$

Cette relation est analogue à celle indiquée pour le régime variable du court-circuit sur impédance aux bornes d'un réseau infini. De même, le courant efficace maximum est  $1,6 I_1^{cc}$ .

Après quelques dixièmes de seconde la courbe du courant efficace total rejoint celle de la composante alternative figure 8.

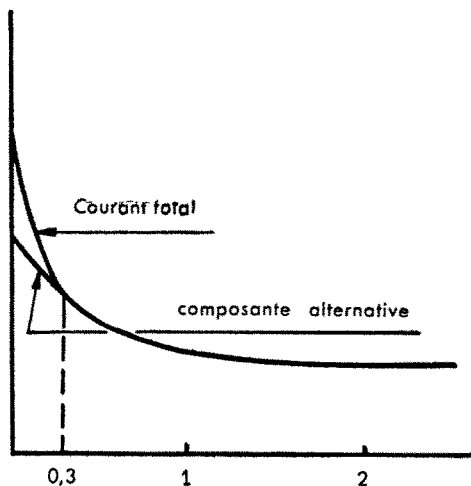


Fig. 8.

Tracé de la courbe du courant efficace en fonction du temps.

Nous connaissons :

1°) 3 points  $M_1, M_2, M_3$  de la courbe de la valeur efficace de la composante alternative (fig. 9).

Les ordonnées  $I_1, I_2, I_3$  sont calculées avec précision.

Les abscisses correspondent à

$$t_1 = 0 ; t_2 = 0,1 \text{ sec.} ; t_3 = 2,5 \text{ sec.}$$

(ces valeurs de  $t_2$  et  $t_3$  sont, non pas calculées, mais admises comme usuelles).

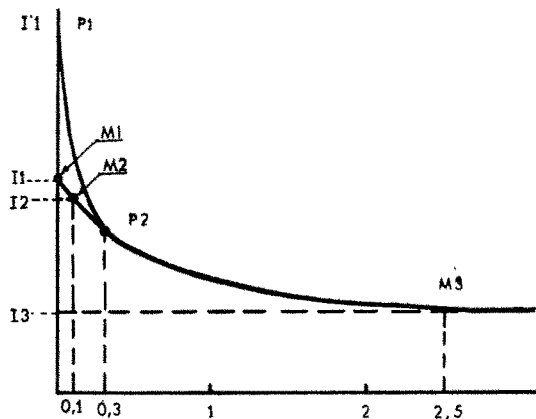


Fig. 9.

2°) 2 points  $P_1, P_2$  de la courbe de la valeur efficace du courant total.

L'ordonnée  $I'_1$  est calculée avec précision.

Les abscisses correspondent à

$$t_1 = 0 ; t_2 = 0,3 \text{ sec.}$$

(cette valeur de  $t_2$  est, non pas calculée, mais admise comme usuelle).

Connaissant l'allure exponentielle amortie de la courbe, on joindra les points ci-dessus par une courbe qui est assez bien définie.

La partie de la courbe à considérer dépend essentiellement du problème que l'on a en vue.

Pour les disjoncteurs non différés, qui, selon leur rapidité, coupent en un temps minimum de 5 à 15 périodes, les

temps à considérer sont compris entre 0,1 et 0,3 secondes.

Pour les études de stabilité, la courbe est à considérer à partir de 0,1 seconde.

Pour le calcul d'échauffement des câbles de faible section et réducteurs d'intensité qui risquent d'être endommagés pendant les premiers dixièmes de seconde, la courbe est à considérer depuis  $t = 0$  jusqu'au temps où le disjoncteur coupe le câble.

Pour les efforts électrodynamiques dans un disjoncteur à l'enclenchement sur c.c., et pour la coupure d'un c.c. intense par fusible, il faut considérer la première demi-onde.

d) *Puissance apparente de court-circuit.*

On ne peut pas parler de puissance apparente de court-circuit d'un alternateur, puisque, lors du court-circuit franc, la tension aux bornes s'annule pratiquement. Mais on appelle puissance apparente fictive de c.c. le produit de la tension normale avant court-circuit, par  $1_{cc} \sqrt{3}$ . Cette puissance apparente fictive, qui intervient pour la détermination du type de disjoncteur à employer, est un multiple de la puissance apparente normale donnée par le tableau page 5.

4. — COURT-CIRCUIT D'UN ALTERNATEUR A VIDE SUR IMPEDANCE EXTERIEURE (fig. 10).

a) *Courant instantané.*

La composante alternative du courant instantané est donnée par la relation :

$$I_{cc} = \frac{U_v}{j x_f + Z_e}$$

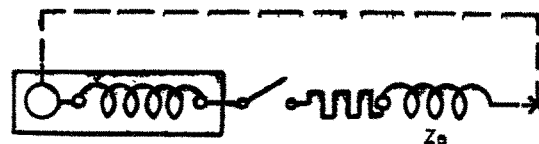


Fig. 10.

b) *Courant permanent.*

Le courant permanent sur impédance extérieure est donné par la relation :

$$I_{cc} = \frac{U_v}{j X + Z_e}$$

Il convient de vérifier que la machine n'est pas saturée pour la tension  $Z_e I_{cc}$  ; sinon l'expression simple ci-dessus n'est pas correcte. Si l'on peut assimiler  $Z_e$  à une pure réactance  $j X_e$ , le calcul se fera par points à l'aide du diagramme de Potier.

5. — COURT-CIRCUIT FRANC D'UN ALTERNATEUR EN CHARGE

a) *Particularités du problème.*

L'alternateur débitant le courant  $I_n$  sous la tension  $U_n$  à son facteur de puissance normal  $\cos \varphi_n$  est mis brusquement en court-circuit triphasé (fig. 11), le point de c.c. étant situé entre l'alternateur et le récepteur.

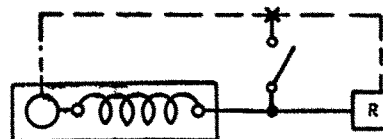


Fig. 11.

La nature des phénomènes est la même que dans le cas précédent, mais, comme nous allons l'indiquer, les courants instantané et permanent sont augmentés, ces majorations tenant au nombre d'ampères-tours beaucoup plus élevé sur l'inducteur dans la marche en charge que dans la marche à vide. Il importe en effet dans ce cas de distinguer la tension aux bornes  $U$  de la force électromotrice  $E$  (valeurs qui se confondaient dans le cas précédent).

b) *Courant instantané.*

La composante alternative du courant *instantané* est donnée par la relation :

$$I_{cc} = \frac{E}{x_f}$$

avec (voir annexe 1) pour l'excitation de pleine charge :

$$E = U_n \left( 1 + \frac{s_f}{100} \sin \varphi_n \right)$$

Par suite, le courant instantané est de l'ordre de 10 à 15 pour cent plus élevé en charge qu'à vide, ce qui peut être négligé. On calculera donc pratiquement le courant de c.c. instantané comme si l'alternateur était à vide avec la tension  $U_n$  à ses bornes.

La composante alternative du courant après quelques périodes est donnée par une relation analogue,  $x_f$  étant simplement remplacé par  $x'_f$ .

c) *Courant permanent.*

Le lecteur se reportera à la note annexe.

Le courant de court-circuit est donné par la relation :

$$I_{cc} = \frac{E}{X} \text{ avec } E = U_n \frac{ATi}{ATv}$$

( $\frac{ATi}{ATv}$  voisin de 3 pour un turbo-alternateur normal).

d) *Schéma équivalent.*

Désignons par  $Z'$  l'impédance équivalente à la charge <sup>(1)</sup>, et  $Z = jx$  celle de l'alternateur ( $x$  désignant  $x_f$ ,  $x'_f$ , ou  $X$  selon l'instant considéré).

On peut écrire :

$$\text{avant le c.c. : } U_n = E_n - Z I_n = Z' I_n$$

$$\text{d'où } E_n = U_n \left( 1 + \frac{Z}{Z'} \right)$$

$$\text{en c.c. : } E - Z I_{cc} = 0.$$

E ayant la même valeur dans les deux cas, puisque l'excitation n'a pas été changée, d'où :

$$I_{cc} = \frac{E}{Z} = \frac{U_n}{Z} + I_n = \frac{U_n}{Z} + \frac{U_n}{Z'} = \frac{U_n}{z}$$

$$\text{en posant } \frac{1}{z} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z'}$$

<sup>(1)</sup> L'impédance  $Z'$  équivalente à la charge est définie par la relation  $\bar{U}_n = Z' \bar{I}_n$

comme  $\bar{I}_n = I_n (\cos \varphi_n - j \sin \varphi_n)$ ,

$U_n$  étant pris comme origine des phases et  $\varphi_n$  désignant le déphasage normal de la pleine charge, il vient :

$$Z' = \frac{U_n}{I_n} (\cos \varphi_n + j \sin \varphi_n)$$

(En désignant par  $P_n$  la puissance apparente normale par phase

$$P_n = U_n I_n \quad \text{il vient } \frac{U_n}{I_n} = \frac{U_n^2}{P_n}$$

L'impédance en pour cent correspondant à la charge est :

$$\frac{Z' I_n}{U_n} \times 100 = 100 (\cos \varphi_n + j \sin \varphi_n)$$

On peut donc écrire soit  $I_{cc} = \frac{E}{x}$  en interprétant  $E$  et  $x$  convenablement, soit  $I_{cc} = \frac{U_n}{z}$  en interprétant  $z$  convenablement.

*Remarque :*

Le fait que l'alternateur est en charge conduit donc finalement à considérer que tout se passe comme si l'alternateur était mis en c.c. à vide, avec la même tension aux bornes, mais avec une impédance  $z$  plus faible que l'impédance  $Z$  correspondant à l'alternateur à vide.

$$\text{Comme } Z = j \frac{s}{100} \frac{U_n}{I_n}$$

$$Z' = (\cos \varphi_n + j \sin \varphi_n) \frac{U_n}{I_n}$$

$$\text{il vient } z = \frac{Z}{K}$$

$$\text{avec } K = \left( 1 + \frac{s}{100} \sin \varphi_n \right) + j \frac{s}{100} \cos \varphi_n$$

pour  $\cos \varphi_n = 0,8$  et  $s = 220$  on aura :

$$K = 2,32 + j 1,76$$

Le module de  $K$  importe seul pour déterminer la valeur du courant de c.c., sa valeur est 2,9, et par suite :

$$z = \frac{Z}{2,9}$$

e) *Remarque sur le rôle du régulateur d'excitation.*

En cas de court-circuit d'un alternateur, le régulateur de tension intervient pour tendre à rétablir la tension normale, en augmentant l'excitation jusqu'au maximum qui correspond à l'excitation de pleine charge, ou même à une excitation plus élevée; si l'excitatrice est prévue pour développer une tension supérieure à celle qui correspond à la pleine charge, en vue d'accroître la rapidité du réglage <sup>(1)</sup>.

Si l'alternateur est à vide lors du court-circuit :

$$U_n = E_v$$

L'excitation restant la même :

$$I_{cc} = \frac{E_v}{X} = \frac{U_n}{X}$$

Si le régulateur met alors l'excitation de pleine charge :

$$I_{cc} = \frac{E_c}{X} = \frac{3 U_n}{X}$$

Le courant de c.c. varie suivant la courbe en trait fort (fig. 12) qui commence sur la courbe de c.c. à vide et finit sur la courbe de c.c. en charge.

La surexcitation présente des inconvénients : l'alternateur étant en court-circuit, le courant de c.c. augmente <sup>(2)</sup>, ce qui provoquerait en durée un échauffement anormal de l'alternateur. Il convient alors de réduire l'excitation pour limiter ce courant. On utilise dans ce but un dispositif limi-

<sup>(1)</sup> Ce sera en général le cas avec les régulateurs automatiques de tension modernes à réglage rapide. Dans le cas où l'on désire une très grande rapidité d'excitation pour le maintien de la stabilité, l'excitatrice est prévue pour développer 2 à 2,5 fois sa tension normale correspondant à l'excitation de charge normale. Son excitation comporte, outre l'inducteur correspondant au régime normal, un inducteur dont le circuit est fermé par un contacteur actionné par un relais en cas de baisse de tension aux bornes de l'alternateur.

<sup>(2)</sup> Le régulateur de tension augmente le courant de c. c. permanent dans le rapport de la tension maximum de l'excitatrice à sa tension initiale.

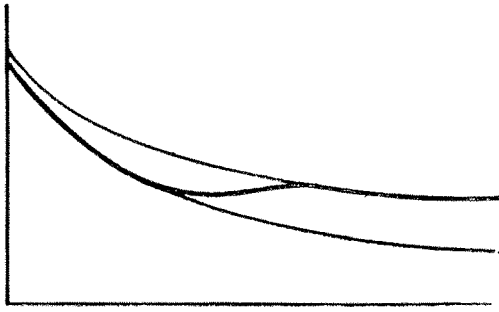


Fig. 12.

teur d'intensité, qui réduit l'excitation lorsque le courant de c.c. dépasse une certaine valeur (1,2 I<sub>n</sub> par exemple) après un certain temps.

Il résulte de ces remarques que le calcul du courant de c.c. permanent est possible avec précision pour un courant d'excitation constant, mais, dans la pratique, sa valeur dépend essentiellement de l'action du régulateur de tension et du limiteur d'intensité. La durée d'action propre de ces appareils est presque instantanée (de l'ordre des centièmes de seconde), mais leur action se trouve différée par le retard que met le courant d'excitation de l'alternateur à s'établir lorsqu'on modifie le réglage de son excitatrice (de l'ordre de quelques secondes pour un réglage normal, et quelques dixièmes de secondes pour un réglage très rapide).

6. — COURT-CIRCUIT SUR REACTANCE D'UN ALTERNATEUR EN CHARGE

Le cas général est celui du court-circuit sur une impédance extérieure Z<sub>e</sub> (fig. 13).

Avant de fermer le disjoncteur sur le court-circuit, on a les relations :

$$V_n = E_n - Z I_n = Z' I_n$$

l'alternateur étant supposé à pleine charge ; V désignant la tension au point a.

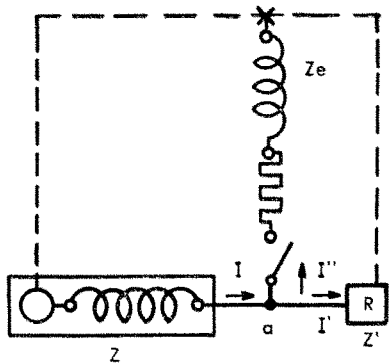


Fig. 13.

Lorsque le court-circuit est établi, on a :

$$V = E - Z I = Z' I' = Z_e I''$$

$$I = I' + I''$$

Si l'excitation n'a pas changé, E est le même dans ces deux relations d'où :

$$I'' = \frac{V_n}{z + Z_e} \text{ avec } \frac{1}{z} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z'}$$

$$I' = I'' \frac{Z'}{Z_e}$$

$$I = \frac{V_n}{Z + Z_e} \left( 1 + \frac{Z_e}{Z'} \right)$$

Dans le cas d'un court-circuit franc en a, on aura :

$$Z_e = 0 \quad V = 0 \quad I' = 0$$

On retrouve alors comme cas particulier la relation de la p. 14 :

$$I = \frac{V_n}{z}$$

Remarque. — On peut également écrire :

$$I'' = E_n \frac{Z'}{Z Z' + Z Z_e + Z' Z_e}$$

les valeurs de E<sub>n</sub> et de Z étant convenablement interprétées comme il a été indiqué page 14.

7. — CONCLUSION

Il résulte de l'ensemble des relations précédentes que le courant de c.c. d'un alternateur est toujours donné par la relation :

$$I = \frac{U}{Z}$$

U étant la d.d.p. aux bornes de l'alternateur,

et Z ayant l'interprétation suivante :

Z est la somme de l'impédance de l'alternateur

et de l'impédance résultante comprise entre les bornes de l'alternateur et le point de défaut.

L'impédance de l'alternateur dépend de :

a) l'état de charge de l'alternateur. — Si Z<sub>v</sub> est l'impédance quand l'alternateur est à vide, la valeur Z<sub>c</sub> de l'impédance quand il est en charge, est moindre.

b) l'instant auquel on considère le phénomène du c.c.

La valeur de Z est donnée par les relations suivantes :

1°) à vide :

$$Z_v = j \frac{s}{100} \frac{U}{I_n}$$

avec s =  $\begin{cases} \text{réactance subtransitoire pour } t = 0 \text{ sec.} \\ \text{— transitoire pour } t = 0,1 \text{ sec.} \\ \text{— synchrone pour } t = 2,5 \text{ à } 3 \text{ sec.} \end{cases}$

2°) en charge :

$$Z_c = \frac{Z_v}{K} \text{ avec}$$

$$K = \text{module de } \left( 1 + \frac{s}{100} \sin \varphi_n + j \frac{s}{100} \cos \varphi_n \right)$$

Remarque. — On peut encore exprimer ces résultats sous la forme équivalente suivante :

Un alternateur A (fig. 14) est relié à un jeu de barres de tension V sur lequel est branché en dérivation une impédance réceptrice B ;

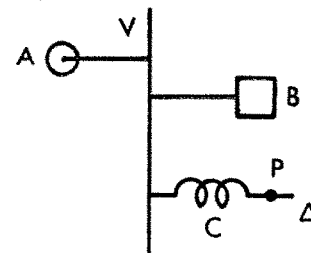


Fig. 14.

Un court-circuit se produit au point P en aval de la réactance C connectée en série dans la dérivation Δ.

Le schéma équivalent à ce système est représenté (fig. 15)

Les impédances Z<sup>A</sup> et Z<sup>B</sup> sont équivalentes à l'impédance z telle que :

$$\frac{1}{Z^A} + \frac{1}{Z^B} = \frac{1}{z}$$

et l'impédance totale est Z<sup>t</sup> = z + Z°.

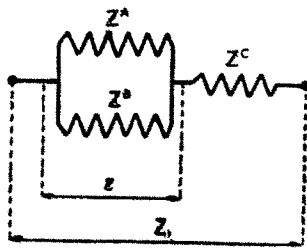


Fig. 15.

Le courant de c.c. triphasé est :

$$I_{cc} = \frac{U}{Z}$$

Si l'on s'intéresse seulement aux impédances transitoires,  $Z^B$  est en général très grand devant  $Z^A$  transitoire et peut être considéré comme infini, ce qui simplifie le schéma des impédances équivalentes.

### 8. — COURT-CIRCUIT ALIMENTÉ PAR DEUX CENTRALES

Considérons deux centrales A et B avec un feeder d'interconnexion *ab* (fig. 16).

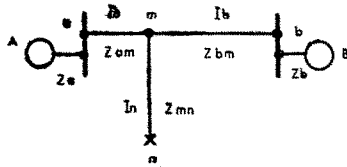


Fig. 16.

Un court-circuit se déclare au point *n* d'une dérivation *mn*.

On demande le courant de c.c. dans cette dérivation ?

Chacune des deux centrales contribue au courant de c.c.

Supposons les deux centrales A et B à vide lors du c.c. La tension commune est *U*.

$$V_m = U - (Z_a + Z_{am}) I_a = U - (Z_b + Z_{bm}) I_b = Z_{mn} I_n$$

$$I_n = I_a + I_b$$

d'où :

$$I_{cc} = \frac{U}{z + Z_{mn}}$$

en posant :

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{Z_a + Z_{am}} + \frac{1}{Z_b + Z_{bm}}$$

Si le court-circuit a lieu au point *m*, la contribution de la centrale A est  $\frac{U}{Z_a + Z_{am}}$  ; celle de la centrale B est

$\frac{U}{Z_b + Z_{bm}}$  ; et par suite on obtient immédiatement la relation :

$$I_{cc} = \frac{U}{z}$$

Cas particulier :

Deux centrales A et B de même f.e.m. *E* sont reliées à un jeu de barres commun (fig. 17) le circuit est ouvert (alter-

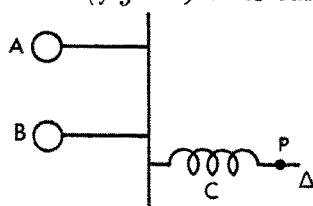


Fig. 17.

nateur à vide). Un court-circuit se produit au point *P* en aval de la réactance *C* connectée en série dans la dérivation  $\Delta$  ;

$$\text{on aura dans ce cas } I_{cc} = \frac{U}{Z}$$

Le schéma équivalent est exactement le même que celui de la figure 15.

Par suite, le calcul du courant ne diffère pas selon que *B* est générateur ou récepteur. Seules les valeurs des impédances diffèrent.

### 9. — RESEAU CONSTITUE PAR UN NOMBRE QUELCONQUE DE CENTRES GENERATEURS ET RECEPTEURS FORMANT UN SYSTEME NON BOUCLE.

Considérons par exemple la figure 18.

$G_1, G_2, G_3$  sont les centres générateurs.

$R_1, R_2, R_3$  sont les centres récepteurs.

*a, b, c* sont les jeux de barres.

$Z_{ab}, Z_{bc}$  sont les impédances des liaisons.

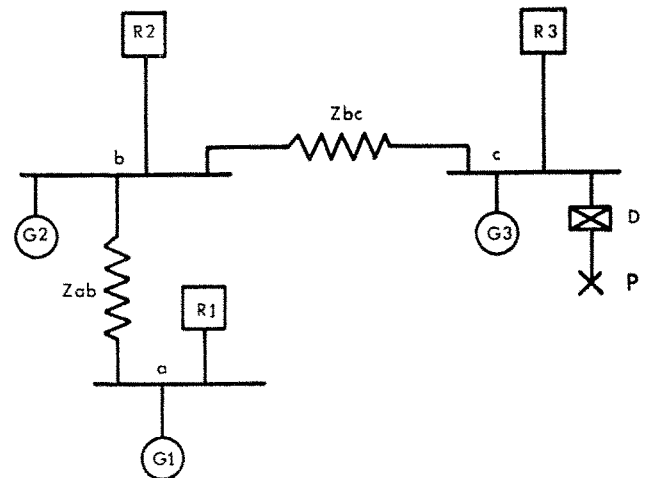


Fig. 18.

Supposons un défaut en *P* intéressant le disjoncteur *D*. Ce système est représenté par le schéma équivalent fig. 19. Ce schéma s'établit de proche en proche de la manière suivante :

Le système  $G_1, R_1$  équivaut à une impédance unique  $Z_1$ . Cette impédance s'ajoute à  $Z_{ab}$ .

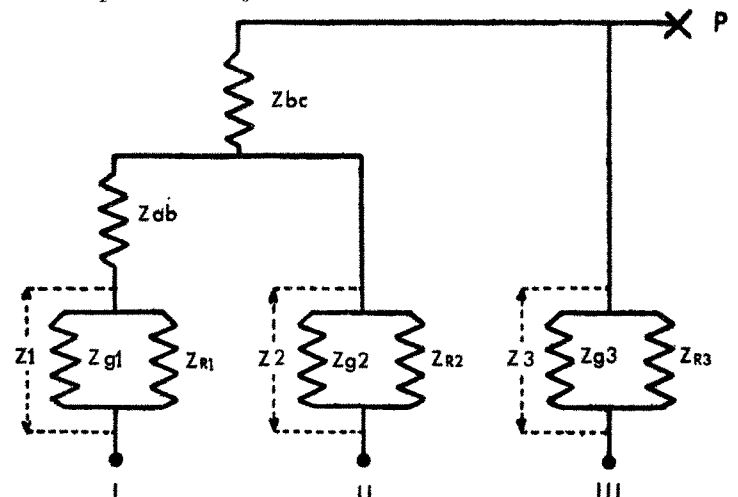


Fig. 19.

Le système  $G_2, R_2$  est équivalent à une impédance unique  $Z_2$ .

Les impédances  $(Z_1 + Z_{ab})$  et  $Z_2$  sont associées en parallèle et sont équivalentes à une impédance unique  $Z_b$ .

Cette impédance s'ajoute à  $Z_{bc}$ .

Le système  $G_3, R_3$  est équivalent à une impédance unique  $Z_3$  qui est parallèle avec  $Z_b + Z_{bc}$ .

Les points I, II et III doivent être considérés comme réunis par une barre commune sur laquelle la tension établie est  $V$ .

L'impédance unique équivalente est celle comprise entre cette barre et le point P.

On peut également décomposer le courant de c.c. total en P, en courants partiels constituant les contributions des différentes centrales : I et II, puis III, apportant séparément leur appoint.

NOTE ANNEXE SUR LES EQUATIONS DE L'ALTERNATEUR SYNCHRONE

Les calculs de court-circuit reposent sur deux relations fondamentales de la théorie de l'alternateur synchrone (1) :

1° Régime permanent :

$$E = U + j X I \quad (1)$$

I étant le courant débité ;

X » la réactance synchrone ;

U » la tension aux bornes ;

E » la f.e.m. correspondant à l'excitation des inducteurs.

En court-circuit on aura :  $I_{cc} = \frac{E}{X}$  (2)

Ces relations supposent :

1° la machine à rotor lisse ;

2° la machine non saturée.

Dans ces conditions la réactance est constante.

2° Régime de court-circuit instantané.

$$E_{cc} = U + j x I \quad (3)$$

I étant le courant débité avant mise en c.c.

x la réactance subtransitoire (ou transitoire selon l'instant considéré du c.c.).

U la tension aux bornes avant mise en c.c.

$E_{cc}$  la f.e.m. engendrée par le courant qui existe dans l'inducteur pendant le régime variable à l'instant considéré du c.c. (et qui diffère du courant d'excitation des inducteurs avant mise en c.c. à cause de la surintensité de régime variable dans l'inducteur).

Il faut joindre à (3) la relation :

$$I_{cc} = \frac{E_{cc}}{x} \quad (4)$$

Il résulte de l'identité de forme des équations (1) (2) (3) (4) que les relations algébriques seront de même forme pour tout instant du court-circuit ; il suffira d'en interpréter les termes.

RÉGIME PERMANENT.

1. Marche normale :

La relation (1) se traduit par le diagramme classique (fig. 20).

Au régime de pleine charge, désignons par :

$U_n$  la tension normale aux bornes ;

$I_n$  le courant normal (facteur de puissance  $\cos\varphi_n$ ).

$E_n$  la f.e.m. correspondant à la pleine excitation.

$AT_v$  les ampères-tours de l'inducteur pour la tension  $U_n$  à vide.

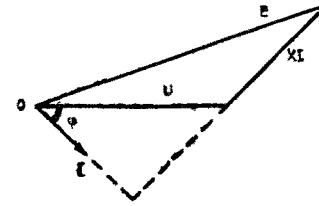


Fig. 20.

$AT_i$  les ampères-tours de l'inducteur à pleine charge.

Nous pouvons écrire, la f.e.m. étant proportionnelle aux  $AT$  de l'inducteur :

$$\frac{E_n}{AT_i} = \frac{U_n}{AT_v} \quad \text{d'où} \quad E_n = U_n \frac{AT_i}{AT_v} \quad (2)$$

$$E_n = U_n + j X I_n \quad (3)$$

Les relations (2) et (3) permettent d'écrire :

$$\frac{AT_i}{AT_v} = 1 + j \frac{S}{100} \quad (4)$$

$$\frac{S}{100} = \frac{X I_n}{U_n} \quad \text{étant la réactance synchrone en pour cent.}$$

Cette relation (4) se traduit par le diagramme (fig. 21) qui fixe une relation entre la réactance synchrone et l'excitation de pleine charge.

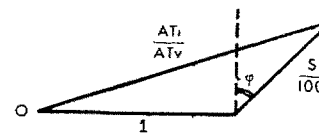


Fig. 21.

2. Marche en court-circuit.

a) Court-circuit franc.

L'alternateur fonctionnant à pleine excitation à sa charge normale et étant mis en court-circuit sans modifier l'excitation

$$I_{cc} = \frac{E_n}{X} = \frac{U_n \frac{AT_i}{AT_v}}{X} = \frac{U_n}{X} + j I_n$$

b) Court-circuit sur impédance :

Le court-circuit s'exprime par la relation :

$$U = (R_e + j X_e) I_{cc}$$

d'où :

$$I_{cc} = \frac{E_n}{R_e + j(X + X_e)} = \frac{U_n \frac{AT_i}{AT_v}}{R_e + j(X + X_e)}$$

relation qui est applicable pour autant que la machine ne soit pas saturée, c'est-à-dire que  $(R_e + j X_e) I_{cc}$  doit rester inférieur à  $U_n$ .

3. — COMPARAISON AVEC LE DIAGRAMME DE POTIER.

Le diagramme de Potier conduit à écrire en court-circuit franc :

$$I_{cc} = \frac{U_n \frac{AT_i}{AT_{cn}}}{X}$$

et en court-circuit sur réactance :

$$I_{cc} = \frac{U_n \frac{AT_i}{AT_{cn}}}{X + X_e}$$

(1) Nous regardons ici comme connues ces deux relations de l'électrotechnique classique.

c'est-à-dire les mêmes relations que celles de la théorie ci-dessus en régime non saturé ;  $AT_{en}$  désignant les AT à vide sur la *partie droite* de la courbe de magnétisation pour la tension  $U_n$ . (La machine ne doit pas être saturée pour la tension  $X_c I_{cc}$  ; sinon le diagramme de Potier reste applicable, mais le calcul de  $I_{cc}$  se fera par points).

On aura en général avec une machine normalement saturée à sa tension normale :

$$AT_v = AT_{en} \times 1,2$$

et par suite :

$$\frac{AT_i}{AT_{en}} = 1,2 \frac{AT_i}{AT_v}$$

Il est à remarquer que le diagramme simplifié des ampères-tours de Behn Eschenburg (*fig. 22*) qui détermine  $AT_i$

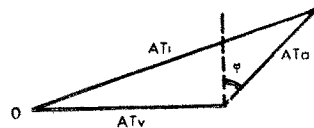


Fig. 22.

directement en fonction de  $AT_v$  et des ampères-tours de réaction  $AT_a$ , constitue une approximation plus grossière que celle qui résulte des relations précédentes et n'est pas en accord avec le diagramme de Potier.

*Régime de court-circuit instantané.*

Le court-circuit franc s'exprime par la relation :

$$U = 0$$

d'où :

$$I_{cc} = \frac{E_{cc}}{x}$$

La f.e.m.  $E_{cc}$  peut se mettre sous la forme :

$$U_n \left( 1 + \frac{s}{100} \sin \varphi_n \right)$$

elle diffère peu de  $U_n$ .

## CHAPITRE II

### Impédances équivalentes

#### 1. — SCHEMAS EQUIVALENTS DES ELEMENTS D'UN RESEAU.

Nous rappellerons ici les schémas équivalents simplifiés auxquels se ramènent les divers éléments du réseau pour le calcul du courant de c.c. (et non les schémas équivalents complets nécessaires aux calculs de régulation, etc...).

##### a) *Alternateur.*

Le schéma équivalent est une f.e.m.  $E$  en série avec une réactance  $Z$ , comme il a été précisé à la note annexe du chapitre I.

##### b) *Transformateur à deux enroulements.*

Le schéma équivalent est une simple impédance  $Z$ , qui se réduit à la réactance de fuites totales  $j x$ , la résistance étant négligeable.

Les valeurs usuelles exprimées en pour cent dépendent de la puissance et de la tension.

##### c) *Transformateur à trois enroulements.*

Le schéma équivalent est un système de 3 impédances,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  avec point commun, qui se réduisent à trois réactances, les résistances étant négligeables.

TENSION	KVA	
	5.000	10.000 et plus
10 KV	4,5	
45	6,5	9 à 12
60	7,5	8
150		8 à 10
220		10 à 14

Soient  $s_{12}^0$ ,  $s_{23}^0$ ,  $s_{31}^0$  les réactances de fuites des trois enroulements pris deux à deux ramenés à la même puissance apparente de base  $P_0$ .

$U_n$  la tension de l'un des 3 réseaux choisie comme tension de base.  $I_n$  le courant correspondant à  $P_0$  sous la tension  $U_n$ .

Les réactances en ohms sont définies par les relations :

$$x_{12} = \frac{s_{12}^0}{100} \frac{U_n}{I_n} \quad x_{23} = \frac{s_{23}^0}{100} \frac{U_n}{I_n} \quad x_{31} = \frac{s_{31}^0}{100} \frac{U_n}{I_n}$$

$$x_{12} = x_1 + x_2 \quad x_{23} = x_2 + x_3 \quad x_{31} = x_3 + x_1$$

d'où  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ...

On aura par exemple :  $U_1 > U_2 > U_3$

et  $s_{12}^0 = 10$   $s_{23}^0 = 5$   $s_{31}^0 = 15$

ce qui donne :

$$s_{11}^0 = 10 \quad s_{22}^0 = 0 \quad s_{33}^0 = 5$$

##### d) *Ligne de transport.*

La ligne se réduit à une impédance simple  $Z$  lorsque l'effet de capacité peut être négligé.

Soit  $r$  la résistance kilométrique

$s$  la réactance kilométrique

$L$  la longueur de la ligne

$$Z = (r + j s) L$$

La résistance  $r = \frac{18}{s}$  ohms, pour une ligne en cuivre,  $s$  étant la section en  $mm^2$ .

La réactance d'une ligne aérienne est de l'ordre de 0,4 ohm/Km. La réactance d'un câble à tension élevée (supérieure à 45 KV) est de 0,13 ohm/Km.

##### e) *Récepteur inerte.*

Nous avons établi p. 7 la relation :

$$Z = \frac{U_n}{I_n} (\cos \varphi_n + j \sin \varphi_n)$$

$I_n$  étant le courant normal du récepteur et  $\varphi_n$  son déphasage arrière.

#### 2. — REDUCTION DES IMPEDANCES A UNE MEME TENSION DE BASE.

Soit une réactance  $x$  en aval d'un transformateur parfait alimenté à la tension  $U_1$  et donnant une tension secondaire  $U_2$  (*fig. 23*).

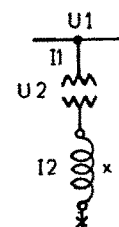


Fig. 23.

$U_1$  est la haute tension et  $U_2$  la basse tension.

Le courant primaire est  $I_1$ , le courant secondaire  $I_2$

$$\beta = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

On aura :

$$U_2 = x I_2$$

$$\frac{U_1}{I_1} = \beta^2 x$$

Tout se passe donc comme si la réactance  $x$  se trouvait dans la haute tension, sa valeur étant  $\beta^2 x$ .

Donc on peut faire passer une impédance du côté BT au côté HT d'un transformateur en multipliant sa valeur par  $\beta^2$  (l'impédance ramenée au côté HT, exprimée en ohms, devient beaucoup plus grande).

### 3. — REDUCTION D'UN SYSTEME COMPLEXE D'IMPEDANCES.

Un système d'impédances quelconque compris entre 2 bornes A et B d'un schéma unifilaire peut se ramener par réductions successives à une impédance simple absorbant la même puissance active et réactive.

En voici deux exemples usuels :

1° Le circuit se ramifie en deux réactances groupées en parallèle,  $s_1$  et  $s_2$  (fig. 24).

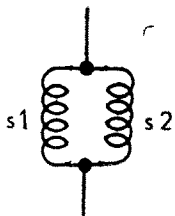


Fig. 24.

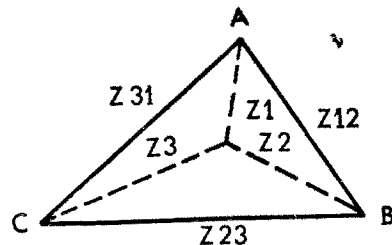


Fig. 25.

La réactance équivalente est  $s$ , définie par la relation :

$$I = \frac{U}{s} \text{ avec}$$

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \quad I_1 = \frac{s_2 I}{s_1 + s_2} \quad I_2 = \frac{s_1 I}{s_1 + s_2}$$

2° Le circuit est constitué par trois impédances groupées en triangle  $Z_{12}, Z_{23}, Z_{31}$  (fig. 25).

Ce circuit est équivalent à 3 impédances fictives groupées en étoile  $Z_1, Z_2, Z_3$  déterminées par les relations de Kenelly :

$$\left\{ \begin{aligned} Z_1 &= \frac{Z_{31} Z_{12}}{Z_t} \\ Z_2 &= \frac{Z_{12} Z_{23}}{Z_t} \\ Z_3 &= \frac{Z_{23} Z_{31}}{Z_t} \end{aligned} \right. \text{ avec } Z_t = Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}$$

(Les deux circuits sont équivalents en ce sens que l'impédance entre deux bornes quelconques est la même).

## CHAPITRE III

### Conduite des Calculs

Le calcul du courant de c.c. se conduit de la manière suivante :

1°) tracer le schéma unifilaire du réseau avec ses éléments constitutifs : alternateurs, compensateurs, transformateurs, lignes, récepteurs.

2°) déduire de ce schéma la carte des impédances du réseau, après avoir remplacé chaque élément par son schéma équivalent.

3°) ramener les impédances à une même tension de base.

Combiner ces impédances entre elles de manière à réduire le système d'impédances à l'impédance simple équivalente.

4°) Calculer le courant de court-circuit en fonction de la tension de base et de l'impédance réduite.

5° Répartition du courant.

Il est souvent nécessaire de connaître, non seulement le courant total de défaut, mais encore sa répartition dans toutes les branches du réseau (représenté par son schéma unifilaire).

Si les impédances partielles se réduisent à des réactances, le courant se divise en raison inverse des réactances.

On remonte de proche en proche de l'impédance simple équivalente au schéma initial.

*Remarque.*

Le courant de défaut en un point d'un réseau dépend :

- 1° de la configuration du réseau (transformateurs et liaison en service) ;
- 2° des centrales qui alimentent (unités en service) ;
- 3° du point de défaut considéré ;
- 4° de l'instant considéré à partir de la mise en c.c.

Le nombre des paramètres est considérable ; l'étude est à faire non seulement pour la configuration et les puissances actuelles mais pour les conditions futures, de manière à ménager l'avenir.

## CHAPITRE IV

### Courant de court-circuit entre deux phases

Le calcul du courant de c.c. entre deux phases se conduit en tous points de la même manière que le calcul du courant de c.c. triphasé, à quelques différences près que nous allons indiquer en suivant le même ordre que pour l'étude du courant de c.c. triphasé.

#### I. — ETUDE DU RÉGIME VARIABLE LORS DE LA MISE EN C.C. BRUSQUE ENTRE 2 PHASES D'UN ALTERNATEUR.

Nous aurons recours à la théorie des composantes symétriques.

1<sup>er</sup> Cas. — Court-circuit franc entre 2 phases d'un alternateur à vide (fig. 26).

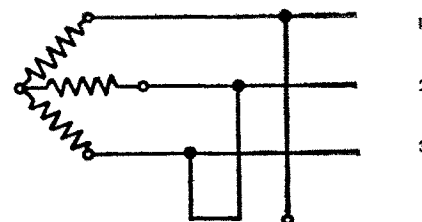


Fig. 26.

a) Le court-circuit étant établi entre les phases 2 et 3, les conditions satisfaites au point de défaut sont :

$$I_1 = 0.$$

$$V_3 = V_2.$$

$$I_3 + I_2 = 0.$$

b) Les relations générales de Fortescue donnent alors :

1° pour les courants :

$$I_0 = 0$$

$$I_d = \frac{a^2 - a}{3} I_3 \quad I_i = \frac{a - a^2}{3} I_3$$

d'où  $I_d + I_i = 0$ .

2° pour les tensions :

$$I_0 = 0 \text{ implique } V_0 = 0$$

$$V_d = \frac{V_1 + (a^2 + a) V_3}{3} \quad V_i = \frac{V_1 + (a + a^2) V_3}{3}$$

d'où  $V_d = V_i$

c) Les relations de Ohm-Kirchoff sont :

$$\begin{cases} V_d = E - Z_d I_d \\ V_i = -Z_i I_i \end{cases}$$

d'où finalement :

$$I_1 = \frac{E \sqrt{3}}{Z_d + Z_i}$$

Les réactances qui figurent dans cette relation sont :

1° Réactance directe,  $Z_d$ . — Sa valeur est la même que pour le court-circuit triphasé symétrique, et dépend de l'instants considéré (réactance subtransitoire, transitoire ou synchrone).

2° Réactance inverse  $Z_i$ . — La réactance inverse d'un alternateur est le rapport de la tension au courant lorsque l'on applique aux bornes une tension triphasée dont la succession de phases est inverse de celle des vecteurs de tension engendrés par le flux principal. Ce courant crée un champ qui tourne par rapport au rotor à 2 fois la vitesse de synchronisme. La réactance ainsi déterminée est constante dans le temps, et donnée en pour cent par le tableau suivant :

GENRE DE MACHINE	Réactance inverse
Turbo-alternateur	12
Alternateur hydraulique :	
avec amortisseur	22
sans amortisseur	50
Compensateur synchrone	24

Ces valeurs correspondent à des machines de conception courante et peuvent être adoptées en moyenne sans erreur importante.

2° Cas. — Court-circuit entre 2 phases d'un alternateur à vide en aval d'une impédance extérieure triphasée (fig. 27).

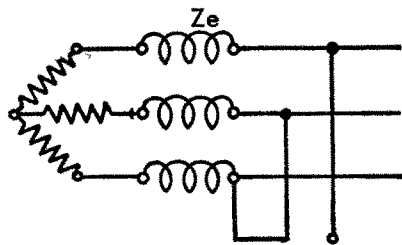


Fig. 27.

L'impédance extérieure se compose :

d'une impédance directe  $Z_d^a$ ,

d'une impédance inverse  $Z_i^a$  qui est égale à l'impédance directe dans le cas d'une bobine de réactance.

L'impédance extérieure s'ajoute simplement à celle de l'alternateur :

$$I_1 = \frac{E \sqrt{3}}{Z_d + Z_i + Z_d^a + Z_i^a}$$

3° Cas. — Court-circuit franc entre 2 phases d'un alternateur en charge (fig. 28).

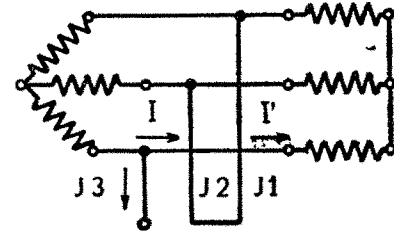


Fig. 28.

Lorsque l'alternateur débite sur un récepteur inerte d'impédance  $Z_d^a$  avec un défaut entre phases en un point situé entre l'alternateur et le récepteur, les impédances sont :

pour l'alternateur  $Z_i, Z_d$ ,  
pour le récepteur  $Z_d^a, Z_i^a$ .

Les relations de Ohm-Kirchoff sont :

$$\begin{cases} V_d = E - Z_d I_d = Z_d^a I_d' \\ V_i = -Z_i I_i = Z_i^a I_i' \\ I_d = J_d + I_d' \\ I_i = J_i + I_i' \end{cases}$$

$I_n$  étant le courant normal qui circule dans l'alternateur avant le défaut, on aura :

$$U_n = E - Z_d I_n = Z_d^a I_n$$

Il résulte des relations précédentes :

$$\begin{aligned} V_d &= U_n - J_d z_d \\ V_i &= -z_i J_i \end{aligned}$$

en posant :

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z'}$$

successivement avec les indices  $d$  et  $i$ .  
d'où :

$$J_1 = \frac{U_n \sqrt{3}}{z_d + z_i}$$

4° Cas. — Court-circuit entre 2 phases sur réactance d'un alternateur en charge.

Lorsque l'alternateur en charge est mis en c.c. sur réactance extérieure, on aura de même : (fig. 29).

$$J = \frac{U_n \sqrt{3}}{z_d + z_i + Z_c + Z_i}$$

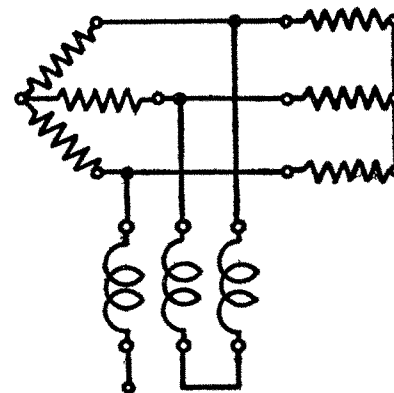


Fig. 29.

CONCLUSION.

Reprenons le schéma de la figure 14 et supposons un défaut entre deux phases au point P.

Le schéma équivalent des impédances inverses comporte les mêmes branches que celui des impédances directes figure 15 ; seules les valeurs des impédances sont différentes.

Le courant de défaut sera :

$$I \text{ défaut} = \frac{U \sqrt{3}}{Z_d^t + Z_i^t}$$

$Z^t$  désignant l'impédance totale résultante, directe et inverse.

Remarque.

Une approximation parfois acceptée pour la simplicité des calculs consiste à identifier le schéma des impédances transitoires directes à celui des impédances inverses.

5° Court-circuit alimenté par deux alternateurs (fig. 16).

Le schéma est identique au précédent.

On généralisera, comme il a été fait pour les impédances directes, au cas d'un réseau non bouclé constitué par un nombre quelconque de générateurs et de récepteurs.

II. — IMPÉDANCES INVERSES DES ÉLÉMENTS D'UN RÉSEAU.

Alternateur : l'impédance inverse a été indiquée ci-dessus.

Transformateur, ligne, récepteur inerte : l'impédance inverse est identique à l'impédance directe car elle est impédante et l'ordre cyclique des phases.

III. — RÉDUCTION DES IMPÉDANCES.

Le calcul se fera comme pour les impédances directes.

IV. — APPLICATION NUMÉRIQUE.

Court-circuit entre 2 phases d'un alternateur à vide :

En cas de court-circuit franc aux bornes

$$Z_e^d = 0 \quad Z_e^i = 0.$$

Pour un turbo-alternateur on aura en désignant par  $I_{cc}$  tri le courant de c.c. entre les 3 phases et par  $I_{cc}$  ph le courant de c.c. entre deux phases :

$t$	$Z_d$	$Z_i$	rapport $\frac{I_{cc} \text{ tri}}{I_{cc} \text{ ph.}}$
0	12	12	$\frac{24}{12 \sqrt{3}} = 1,15$
0,1	19	12	$\frac{31}{19 \sqrt{3}} = 0,95$
permanent	220	12	$\frac{232}{220 \sqrt{3}} = 0,64$

Le courant permanent de c.c. entre phases est donc 1,64 fois plus grand que le courant de c.c. triphasé.

Supposons maintenant une grande réactance extérieure, égale à 100; les valeurs directes et inverses de cette réactance étant égales.

$t$	$Z_d + Z_e^d$	$Z_i + Z_e^i$	rapport $\frac{I_{cc} \text{ tri}}{I_{cc} \text{ ph.}}$
0	112	112	$\frac{224}{112 \sqrt{3}} = 1,15$
0,1	119	112	$\frac{231}{119 \sqrt{3}} = 1,12$
permanent	320	112	$\frac{432}{320 \sqrt{3}} = 0,78$

(à suivre)

## La vie et les travaux d'André-Marie AMPÈRE (1775-1836)

« Un physicien mathématicien de génie »  
par V. SYLVESTRE, Ingénieur A.M. et I.E.G.



« Il était aussi grand  
Aussi simple,  
Qu'il était bon ».

Le 24 novembre 1793 Jean-Jacques Ampère, bourgeois de Lyon, ancien négociant en soie et Juge de paix du canton de la Halle aux blés, mêlé aux luttes politiques qui, en 1793, mirent à Lyon aux prises girondins et jacobins, monta sur l'échafaud !

Dans une lettre que ce simple bourgeois adressait à sa femme la veille de mourir, il lui disait :

« Quant à mon fils il n'y a rien que je n'attende de lui » ; et plus loin, au milieu de quelques notes d'économie domestique :

« Ma plus forte dépense a été l'achat de livres et instruments de géométrie dont notre fils ne pouvait se passer pour son instruction, mais cette dépense était une sage économie puisqu'il n'a jamais eu d'autre maître que lui-même.

Ce fils était : André-Marie Ampère.

Né à Lyon le 22 janvier 1775 sur la paroisse Saint-Nizier,