

Generalitat de Catalunya

EXTENSIO  
D'ENSENYAMENT  
TÈCNIC



*TEXT N.º C-46*

CÀLCUL I CONSTRUCCIÓ  
D'ALTERNADORS

SEGONA PART

Carrer d'Urgell 187 Barcelona



QUADERN 46

CÀLCUL I CONSTRUCCIÓ D'ALTERNADORS II

Pàgina	Ratlla	Pro- blema	On diu	Ha de dir
15	2		fig. 11	fig. 10
25	7		$N_{pp}$	$N_{pf}$
25	12		$N_{pp}^i$	$N_{p}^i$
26	—6		retardat	avançat
26	—2		el vector $O$	el vector $O\Phi$
29	fig. 22		$M_s$	$M_E$
30	28		$c' d'$	$c' a'$
34	5		l'angle $a$	l'angle $\alpha$
43		22	la resistència de l'induït és de 0,2 ohms.	la resistència de l'induït és de 0,5 ohms.





R. 7723

# CÀLCUL I CONSTRUCCIÓ D'ALTERNADORS

SEGONA PART

## TEORIA DELS ALTERNADORS

1. *Nombre de pols.* — Si la freqüència és fixada, com succeeix gairebé sempre, i ens donen la velocitat a què es desitja que giri l'alternador, el nombre de pols pot trobar-se fàcilment per la fórmula (PRIMERA PART, núm. 5).

$$p = \frac{60 \omega}{n}$$

en la qual,  $p$  representa el nombre de parells de pols, i les altres lletres tenen la significació ja coneguda.

En molts alternadors la velocitat és una condició imposada, ja que, generalment, són directament acoblats a turbines. La freqüència també ho és. Per tant, cal projectar un gran nombre de tipus especials de màquines subjectes a aquestes condicions, variant el nombre de pols i amb enrotllament apropiat a la tensió que han de produir per la velocitat donada, cosa que no succeïa amb les dinamos de corrent continu, on pot ésser variada la velocitat i la tensió amb el sol canvi de l'enrotllament de l'induït.

El nombre de pols als alternadors, varia, doncs, en gran manera segons la freqüència i velocitat llur. Així, s'han construït alternadors amb un nombre de pols variant des de quatre a vuitanta i més. En general, pot dir-se que el nombre de pols creix amb les dimensions de la màquina, car la velocitat dels grans alternadors ha d'ésser petita perquè la força centrífuga no sigui excessiva.

2. El nombre de pols, en relació a la potència i velocitat d'alguns tipus comercials de màquines, pot veure's a la taula següent:

TAULA I

VELOCITAT I NOMBRE DE POLS DELS ALTERNADORS DE 50 PERÍODES

Potència kVA	Màquines de gran velocitat		Turboalternadors	
	Velocitat: rev per m	Nombre de pols: $2p$	Velocitat: rev per m	Nombre de pols: $2p$
100	500	12		
200	375	16		
300	375	16		
400	375	16		
500	300	20	3000	2
600	300	20	3000	2
750	250	24	3000	2
1000	200	30	3000 o 1500	2 o 4
1500			1500	4
2000			1500 o 1000	4 o 6
3000			1500 o 1000	4 o 6
5000			1000	6
7500			750	8

3. *Exemple 1.* — Si un alternador d'una freqüència de 50 períodes gira a 750 revolucions per minut, quants pols ha de tenir?

*Resolució:*

$$p = \frac{60 \cdot n}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750} = \frac{3000}{750} = 4 \text{ parells de pols.}$$

*Exemple 2.* — Quants pols cal que tingui un alternador de 50 períodes, acoblat a una turbina que dona 150 revolucions per minut?

*Resolució:*

$$p = \frac{50 \cdot 60}{150} = \frac{3000}{150} = 20 \text{ parells de pols.}$$

4. *Forma de l'onda de la f.e.m.* — La corba de la f.e.m. produïda per un alternador, no resulta del tot sinusoidal, si no ho és el seu camp magnètic.

Les màquines, amb grans bobines dins ranures, generalment, donen una corba que és més o menys punxaguda i irregular, i que, en general, és millor adaptada que la sinusoidal per als circuits d'il·luminació. Si, en canvi, s'utilitza per al subministre de força, és millor tenir una màquina que doni una corba de la força electromotriu més aplanada, i això pot obtenir-se adop-

tant un enrotllament apropiat per a l'induït i una forma convenient per a les expansions polars.

Adoptarem, en cada cas, una forma dels pols i un enrotllament adequat al treball de l'alternador, tenint presents les lleis que regulen la producció de la f.e.m. i la mena d'enrotllament escollit.

5. *Relació entre l'arc polar i el pas polar.* — Als alternadors moderns els pols no tenen una secció uniforme, sinó que són proveïts, a l'extrem pròxim a l'induït, d'expansions polars, que poden ésser postisses o d'una sola peça amb el pol, com la forma indicada a la fig. 1. La distància  $a$  entre els centres de cada dos pols consecutius, mesurada al llarg de la circumferència del cercle determinat per les cares polars, és dita *pas polar*.

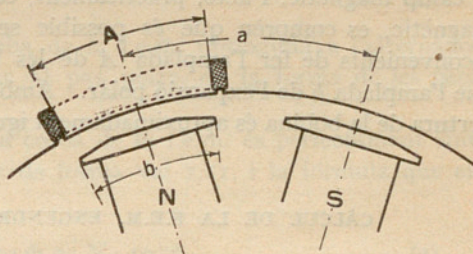


FIG. 1

La longitud  $b$  de la cara polar mesurada sobre la mateixa circumferència és dita *arc polar*.

La relació  $\beta = \frac{b}{a}$  entre l'arc polar i el pas polar varia entre 0,5 i 0,7 a les màquines modernes.

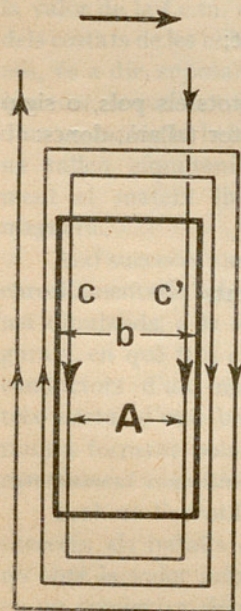


FIG. 2

6. *Amplada de la bobina.* — La forma de la corba de la f.e.m. depèn, principalment, de la forma relativa de les bobines i de les expansions polars i de la manera com els conductors estan disposats a la superfície de l'induït.

L'amplada de l'obertura  $A$  de la bobina no pot fer-se gaire més petita que la de l'expansió polar  $b$ . Pot fer-se lleugerament més estreta, sense gran inconvenient, però, si s'hi fa massa, les f.e.m. engendrades als diferents conductors de la mateixa bobina podrien anular-se en lloc de sumar-se, per ésser oposades una a l'altra les engendrades a cada costat de la bobina, inutilitzant-se així la totalitat o gran part de la f.e.m. engendrada. Això pot veure's a la fig. 2, on hi ha dibuixada una bobina de tres espires, que té una amplada  $A$  més petita que la de l'expansió polar  $b$ . Quan la bobina es mou, travessant la cara polar en la direcció de la sageta, les f.e.m. induïdes als dos conductors  $c$  i  $c'$  tenen la mateixa direcció per tallar línies de força del mateix pol, i, en con-

seqüència, aquestes dos f.e.m. s'oposen l'una a l'altra en lloc de sumar-se, com pot veure's seguint la direcció de les sagetes que assenyalen el sentit del corrent.

Com que quan l'alternador es carrega, la reacció de l'induit distorsiona el camp magnètic, i això, pràcticament, equival a reduir l'amplada del flux magnètic, es comprèn que és possible sense perill d'exposar-se a aquests inconvenients de fer l'amplada  $A$  de les bobines lleugerament més estreta que l'amplada  $b$  de l'expansió polar. Amb tot, usualment, l'amplada de l'obertura de la bobina és aproximadament igual a l'amplada de l'expansió polar.

#### CÀLCUL DE LA F.E.M. ENGENDRADA ALS ALTERNADORS

7. Per a trobar la fórmula que ens doni la f.e.m. engendrada en un alternador, recordem que la f.e.m. mitjana engendrada en un conductor és igual al nombre de línies de força que talla per segon, dividit per  $10^8$ .

Llavors, si anomenem:

$n$  al nombre de revolucions del rotor per minut;

$2p$  al nombre de pols;

$\Phi$  al flux total corresponent a cada pol;

$N$  al nombre de conductors en sèrie de l'enrotllament;

tindrem:

A cada revolució, cada conductor talla el flux de tots els pols, o sigui un total de  $2p \Phi$  línies de força. Cada segon el conductor tallarà, doncs:

$$\frac{2p\Phi n}{60} \text{ línies de força.}$$

La f.e.m. mitjana induïda a cada conductor, serà, per tant,

$$e_m = \frac{2p\Phi n}{60 \cdot 10^8}$$

I la f.e.m. mitjana obtinguda a tot l'enrotllament:

$$E_m = \frac{2p\Phi n N}{60 \cdot 10^8}$$

I com que

$$\frac{pn}{60} = \omega$$

tindrem

$$E_m = \frac{2\Phi \omega N}{10^8} = 2\Phi \omega N \cdot 10^{-8}$$

La valor eficaç  $E$  de la f.e.m. obtinguda, l'obtidrem multiplicant aquesta f.e.m. mitjana pel *factor de forma* de l'onda de la f.e.m. (CORRENTS ALTERNIS, PRIMERA PART, núm. 20). Si anomenem  $f$  aquest factor, tindrem:

$$E = 2 f \Phi \sim N \cdot 10^{-8} \quad (1)$$

El factor de forma, de la corba de la f.e.m. obtinguda a l'alternador, depèn de la relació de l'arc polar al pas polar, de la forma de les peces polars, etc.

Si suposem que la forma de la corba de la f.e.m. és perfectament sinusoidal, llavors sabem que el factor de forma val 1,11, i la fórmula que ens donarà la f.e.m. eficaç, serà

$$E = 2,22 \Phi \sim N \cdot 10^{-8} \quad (2)$$

Podrem dir, doncs, que quan el camp és sinusoidal, la valor eficaç de la f.e.m. obtinguda és 2,22 vegades el producte del flux d'un pol, per la freqüència i pel nombre de conductors de l'enrotllament, dividit per  $10^8$ .

8. *Factor de repartiment d'una bobina.* — La fórmula anterior ens dona la valor de la f.e.m. engendrada, en l'hipòtesi d'ésser menyspreable l'amplada dels costats de les bobines, és a dir, suposant que tots els conductors d'un costat de la bobina tallen simultàniament el mateix flux magnètic.

Així succeeix amb enrotllaments de la forma dibuixada a la figura 3, en què tots els conductors d'un mateix costat d'una bobina,

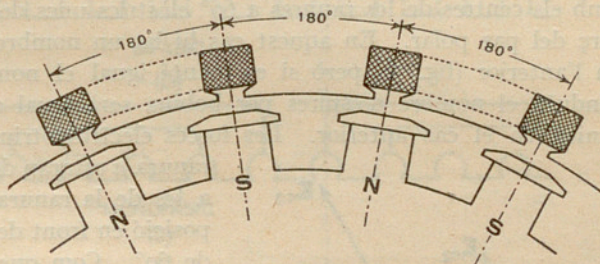


FIG. 3

corresponents a cada pol, van ficats en una sola ranura formant bobines grans. Un enrotllament d'aquest tipus s'anomena *enrotllament concentrat*.

Però si l'enrotllament és *repartit* sobre la superfície del tambor, com succeeix als induïts de corrent continu, la f.e.m. induïda a cada conductor no obté la valor màxim al mateix instant en tots ells, sinó successivament en un conductor després de l'altre.

9. Així, la fig. 3 representa un fragment d'induït amb enrotllament monofàsic *concentrat*, o sigui amb una sola ranura per pol. Les ranures estan espaiades a  $180^\circ$  elèctrics, i havent-hi sols una ranura per pol tots els conductors estan reunits, i la f.e.m. assoleix en tots ells la seva valor màxim

al mateix instant. I si totes les bobines estan connectades en sèrie, la f.e.m. engendrada en totes elles és la suma de les engendrades a cada espira, i essent  $N_e$  el nombre total d'espires en sèrie, la f.e.m. total  $E$  serà igual a

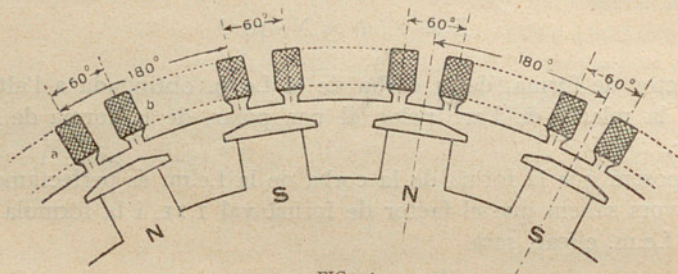


FIG. 4

l'engendrada en una d'elles multiplicada per  $2 N_e$ , essent, per tant, la fórmula anterior l'expressió correcta de la f.e.m. total.

Però si l'enrotllament és *repartit*, les forces electromotrius a les diverses espiras d'una bobina donada no assoleixen la seva valor màxima al mateix instant, i per a un nombre d'espires donat, la força electromotriu és més petita que la que s'obtingria amb un enrotllament concentrat. La fig. 4 representa un enrotllament monofàsic repartit amb dues ranures per pol, amb els centres de les ranures a  $60^\circ$  elèctrics unes de les altres, o sigui a un terç del pas polar. En aquest cas hi ha un nombre doble de bobines que en l'anterior (fig. 3), però si es manté igual el nombre total d'espires de l'induït, el nombre d'espires per bobina serà igual a la meitat de les que tenien en el cas anterior. Les forces electromotrius als conductors de la

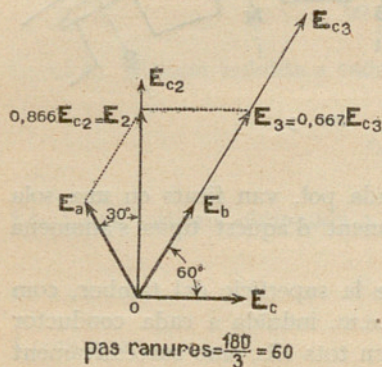


FIG. 5

ranura  $a$  estaran defasades de  $60^\circ$  respecte a les de la ranura  $b$  perquè assoleixen la posició en front dels pols després d'un gir de  $60^\circ$ . Com que el nombre de conductors per ranura o espiras per bobina és igual a la meitat d'abans, la força electromotriu  $E_a = E_b$  a cada una de les dues sèries de bobines serà

$$E_a = E_b = \frac{I}{2} 2,22 \Phi \approx N \cdot 10^{-8}$$

on  $N_e$  és el nombre total d'espires de l'induït. I si les espiras de les dues ranures, o sigui els dos sistemes de bobines, estan en sèrie, la força electromotriu total serà la resultant obtinguda composant les forces electromotrius de cada grup, defasades de  $60^\circ$ , en la forma indicada a la fig. 5, en la qual  $O E_a$  representa

la força electromotriu  $E_a$  d'un grup, i  $O E_b$  la  $E_b$  corresponent a l'altre grup. La resultant de les dues forces és  $O E_2$ , que és la força electromotriu  $E_2$  obtinguda quan totes les bobines estan connectades en sèrie. O sigui:

$$E_2 = 2 \left( \frac{I}{2} 2,22 \Phi \sim N \cdot 10^{-8} \right) \cdot \cos 30^\circ = 0,866 2,22 \Phi \sim N \cdot 10^{-8}$$

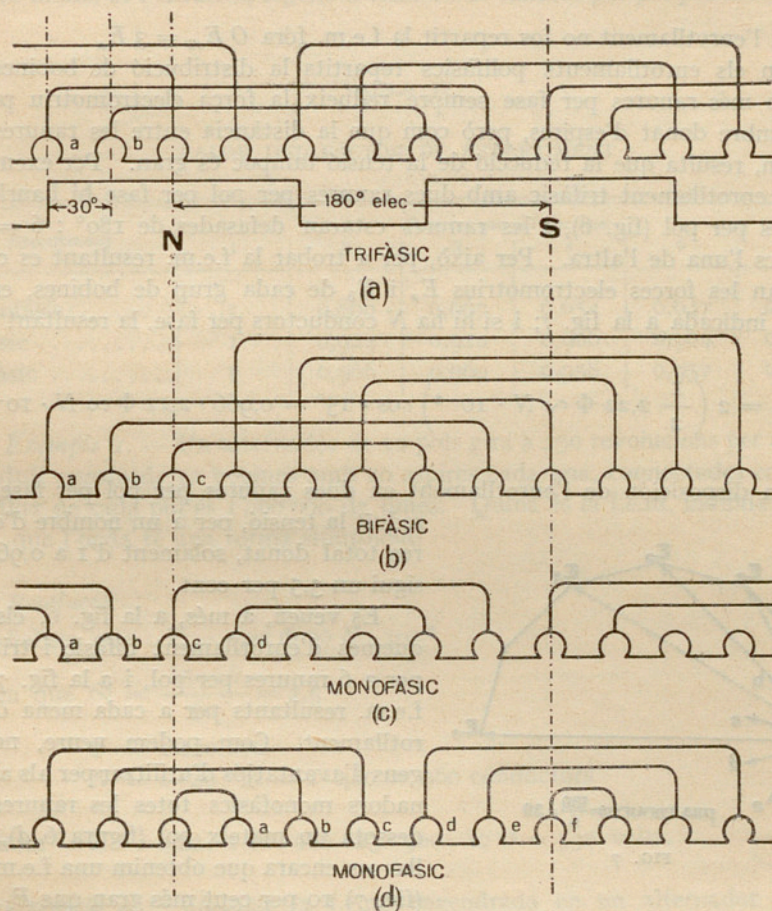


FIG. 6

Si l'enrotllament no està repartit, la força electromotriu total fóra  $O E_{e2} = 2 E_a$ ; per tant, la reducció de tensió en repartir l'enrotllament és de  $O E_{e2}$  a  $O E_2$ .

Si l'enrotllament està repartit en 3 ranures per pol i es manté el mateix nombre d'espires com anteriorment, la f.e.m. resultant es trobarà en la forma indicada a la fig. 5. Les tres forces electromotrius  $E_a$ ,  $E_b$ ,  $E_c$

estan defasades de  $60^\circ$  una respecte a l'altre, i com que cada una és igual a  $\frac{1}{3} 2,22 \Phi \sim N \cdot 10^{-8}$ , la força electromotriu resultant  $O E_3$  és, calculada trigonòmicament,

$$E_3 = 0,667 \cdot 2,22 \Phi \sim N \cdot 10^{-8}$$

Si l'enrotllament no fos repartit la f.e.m. fóra  $O E_{e3} = 3 E_a$

En els enrotllaments polifàsics repartits la distribució de bobines en dues o més ranures per fase sempre redueix la força electromotriu per a un nombre donat d'espores, però com que la distància entre les ranures no és gran, resulta que la reducció de la tensió tampoc és gran. Per exemple, en un enrotllament trifàsic amb dues ranures per pol per fase hi haurà sis ranures per pol (fig. 6), i les ranures estaran defasades de  $180^\circ : 6 = 30^\circ$  elèctrics l'una de l'altra. Per això, per a trobar la f.e.m. resultant es compondran les forces electromotrius  $E_a$  i  $E_b$  de cada grup de bobines, en la forma indicada a la fig. 7; i si hi ha  $N$  conductors per fase, la resultant serà

$$O E_2 = 2 \left( \frac{1}{2} 2,22 \Phi \sim N \cdot 10^{-8} \right) \cos \cdot 15^\circ = 0,966 \cdot 2,22 \Phi \sim N \cdot 10^{-8}.$$

La disposició de l'enrotllament en dues ranures per pol per fase, ha reduït la tensió, per a un nombre d'espores total donat, solament d'1 a 0,966, o sigui un 3,5 per cent.

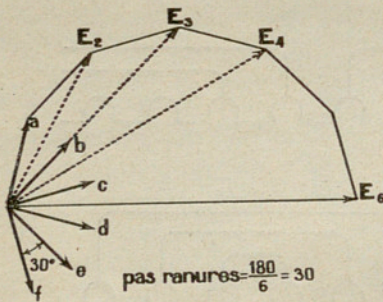


FIG. 7

Es veuen, a més, a la fig. 6, els esquemes d'enrotllament bifàsic i trifàsic per a 6 ranures per pol, i a la fig. 7 les f.e.m. resultants per a cada mena d'enrotllament. Com podem veure, no és gens d'avantatjós d'utilitzar per als alternadors monofàsics totes les ranures de dessota un mateix pol (figura 6 d), car llavors encara que obtenim una f.e.m.  $E_6$  (fig. 7) 10 per cent més gran que  $E_4$ , ob-

tinguda deixant dues ranures per omplir (fig. 6 c), caldrà emprar 50 per cent més de coure.

10. Cal, doncs, afegir a les fórmules (1) i (2) del núm. 7 un coeficient  $f_1$ , anomenat *factor de repartiment*, que és més petit que la unitat pels enrotllaments repartits, disminuint a mesura que augmenta el nombre de ranures per pol per fase, i el nombre de fases; tindrem, doncs:

$$E = 2 f f_1 \Phi \sim N \cdot 10^{-8} \quad (3)$$

I pel cas d'ésser sinusoidal la corba de la f.e.m:

$$E = 2,22 f_1 \Phi \infty N \cdot 10^{-8} \tag{4}$$

A continuació donem les valors del factor de repartiment per a enrotllaments mono, bi i trifàsics, segons el nombre de ranures per pol per fase.

TAULA II

VALOR DEL FACTOR DE REPARTIMENT

Enrotllament	Ranures per pol per fase					
	1	2	3	4	5	6
Monofàsic . . . . .	1	0,866	0,667	0,654	0,647	0,637
Bifàsic . . . . .	1	0,924	0,910	0,906	0,904	0,903
Trifàsic . . . . .	1	0,966	0,960	0,958	0,957	0,956

*Exemple 1.* — Un alternador de 12 pols gira a 250 revolucions per minut. L'induït consta de 12 bobines amb 40 espires cada una, connectades en sèrie, i el flux de cada pol és 1 000 000 de línies. Quina és la f.e.m. induïda, suposant que l'onda té una forma sinusoidal?

*Resolució:*

Sabem que :  $E = 2,22 \Phi \infty N \cdot 10^{-8}$

i com que  $\infty = \frac{250 \cdot 6}{60} = 2,5$

$\Phi = 1\ 000\ 000$

$N = 2 \cdot 40 \cdot 12 = 2 \cdot 480 = 960$  conductors

tindrem  $E = 2,22 \cdot 1\ 000\ 000 \cdot 2,5 \cdot 960 \cdot 10^{-8} = 532$  volts.

*Exemple 2.* — Calcular la f.e.m. engendrada en un alternador monofàsic, amb les dades següents, i en la hipòtesi que la corba de distribució del flux és sinusoidal.

Velocitat : 365 rev per m.

Nombre de pols : 16.

Nombre de ranures : 48.

Conductors per ranura : 2.

Conductors totals :  $2 \times 48 = 96$ .

Flux per pol : 3 100 000 línies.

*Resolució:*

El nombre de ranures per pol és  $\frac{48}{16} = 3$ ; per tant, el factor d'amplada serà (TAULA II),  $f_1 = 0,667$ .

La freqüència, serà  $\omega = \frac{375 \cdot 8}{60} = 50$  períodes.

Així, doncs:

$$E = 2,22 \cdot 0,667 \cdot 3 \cdot 100\,000 \cdot 50 \cdot 96 \cdot 10^{-8} = 220 \text{ volts.}$$

11. Si els dos grups de conductors dibuixats a la fig. 4 fossin col·locats tots en una sola ranura, pràcticament tots foren afectats per les variacions del flux al mateix temps; el factor de repartiment fóra 1. Per tant, per a una longitud activa de conductor donat, sense càrrega, l'enrotllament *concentrat* produeix una f.e.m. més gran que l'enrotllament *repartit*.

Sembla, doncs, a primera vista, que és més avantatjós l'ús d'enrotllaments concentrats. Però, en carregar l'alternador, l'avantatge ja no és tan gran, car el repartir les bobines en diverses ranures, disminueix la inductància de l'enrotllament, i llavors la caiguda de tensió en càrrega, com veurem, no és tan gran; disminueix, també, com veurem, la reacció d'induït en càrrega; i, a més, l'enrotllament repartit assegura una uniformitat més gran de temperatura i ventilació, i un aprofitament més gran de l'espai i de la màquina. Així, és, avui en dia, general l'ús d'enrotllaments repartits. S'usen correntment de 2 a 5 ranures per pol als alternadors de velocitats mitjanes, i de 4 a 6 als turbo-alternadors.

De moment, però, usarem, als paràgrafs successius, la fórmula (2) del núm. 7, que dona la valor de la f.e.m. quan la màquina gira en circuit obert i el camp és sinusoidal i l'enrotllament concentrat.

#### VALOR DE LA F.E.M. AMB CÀRREGA

12. La f.e.m. als terminals d'un alternador és, a circuit obert, la donada a la fórmula (2) del núm. 7. Però si amb la mateixa velocitat i excitació tanquem el circuit de l'alternador i la màquina treballa amb càrrega inductiva, la f.e.m. als terminals de l'alternador és inferior a la valor de la f.e.m. a circuit obert.

La caiguda de tensió en tancar el circuit de la màquina és deguda a diverses causes:

En primer lloc, a la caiguda òhmica a l'induït, que creix amb la càrrega.

En segon lloc, tractant-se de corrents alterns, hi haurà també una caiguda a la f.e.m., necessària per a vèncer la reactància de l'induït.

I, a més, com que el corrent que passa pels conductors de l'induït produeix un camp magnètic que reacciona amb el flux dels inductors, s'esdevé

una desmagnetització i distorsió del camp de la màquina, la qual cosa origina també una caiguda de tensió.

Aquesta darrera caiguda, a més de variar amb la càrrega, varia també amb l'angle de decalatge entre el corrent i la tensió que forneix l'alternador, és a dir, amb el factor de potència del circuit on treballa.

#### IMPEDÀNCIA DE L'INDUÏT

13. Els efectes de la impedància de l'induït podem comprendre'ls perfectament mirant la fig. 8.

Suposem, abans de tot, que es mantenen constants la velocitat de rotació de l'alternador i la intensitat magnètica del camp. La f.e.m. engendrada a l'induït es manté constant perquè no varia el nombre de línies de força que talla l'induït, malgrat que prenguem corrent de la màquina, mentre aquest corrent que circula sigui constant.

Suposem que el corrent de l'alternador és destinat a alimentar circuits no inductius, com, per exemple, il·luminació per làmpades d'incandescència, i que el corrent al circuit exterior vingui representat per la recta  $oi$  (fig. 8 a).

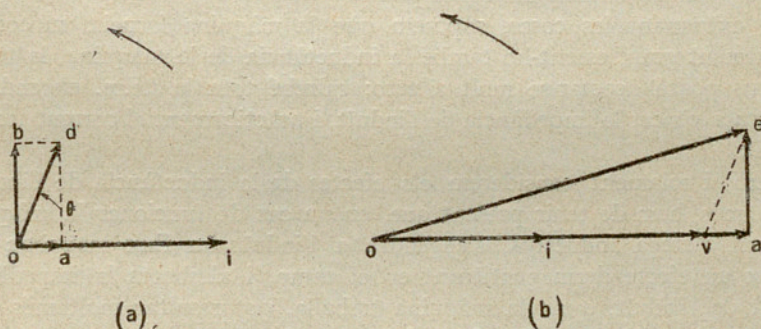


FIG. 8

La f.e.m. necessària per a vèncer la resistència de l'induït serà  $RI$ , que representarem per  $oa$ , en fase amb el corrent. La f.e.m. necessària per a vèncer la reactància de l'induït, que val  $2\pi \sim LI$ , la representarem per  $ob$ , decalat cap endavant de  $90^\circ$ . I, finalment, la f.e.m. total, necessària per a vèncer juntes la resistència i la reactància, o sigui la impedància de l'induït, i que val  $I\sqrt{R^2 + (2\pi \sim L)^2}$ , vindrà representada per la suma dels dos vectors anteriors  $od$ , defasada cap endavant d'un angle  $\theta$ , del corrent.

Si ara, traslladant-nos a la fig. 8 b, sumem aquesta f.e.m.  $od$ , o les seves components, amb la tensió  $U = ov$  als borns de l'alternador, tindrem que la f.e.m. total engendrada valdrà  $E = oe$ , la qual tindrà una valor constant

mentre romanguin invariables la velocitat de l'alternador i la intensitat del camp magnètic.

Sempre que l'alternador treballi amb càrrega no inductiva la tensió als borns  $U$  estarà en fase amb el corrent  $I$ , i els seus vectors tindran la mateixa direcció.

La línia  $od$  (fig. 8 a) representa la caiguda de tensió avançada d'un angle  $\theta$  respecte el corrent, per efecte de la impedància interna de l'induït.

Per tant (fig. 8 b), hem compost geomètricament aquests dos vectors de tensió, obtenint el vector  $oe = E$ , que és la f.e.m. total engendrada a l'alternador, suma de la tensió als borns i de la caiguda d'impedància a l'induït.

Es veu clarament que la caiguda de tensió total, diferència entre  $E$  i  $U$ , és considerablement més important que en el cas de corrent continu, on sols havia de tenir-se en compte la caiguda òhmica.

14. *Impedància real i impedància aparent o de sincronisme.* — Examinant els dos diagrames de la fig. 8 es veurà que si la inductància de l'induït és gran, comparada amb la seva resistència, la línia  $od$  resultant serà més llarga, i l'angle que forma amb la direcció del corrent s'aproximarà a  $90^\circ$ .

Conseqüència d'això, per a una mateixa f.e.m.  $E$  engendrada a l'induït, la tensió  $V$  als borns serà molt més petita.

Si, extremant les coses, suposem que la màquina forneix un corrent suficientment gran, essent-ho també la inductància de la màquina, la tensió als borns podrà acostar-se molt a zero; gairebé tota la f.e.m. engendrada s'esmerça a vèncer la impedància de l'induït, i pràcticament el corrent resulta desvatat.

Això si solament considerem els efectes de la inductància de l'induït. Però, a més, hem de tenir present que, en un cas de funcionar la màquina amb una càrrega inductiva, s'engendra a l'induït un flux magnètic que exerceix un efecte desmagnetitzant en el camp, i aleshores la impedància aparent de l'induït, quan la màquina treballa, pot resultar molt més gran que la seva impedància real amb l'induït en repòs.

La prèvia recerca de la caiguda de tensió corresponent, quan creix la càrrega, és, per tant, d'un treball bastant complicat, i depèn, com hem dit, no sols de la resistència i inductància de l'induït, *impedància real*, sinó, també, dels efectes complicats de la distorsió i desmagnetització que en el camp produeix la reacció de l'induït.

La inductància resultant de l'induït a conseqüència de tots aquests efectes, s'anomena *impedància aparent o de sincronisme*, per distingir-la de la impedància real, que prové solament de la resistència i inductància de l'induït.

15. *Inductància de l'induït.* — La inductància exigeix una força electromotriu per fer circular el corrent per l'induït, ço que dóna lloc a una disminució

de la tensió als borns. D'altra banda, la inductància decala el corrent respecte a la força electromotriu induïda, i, per tant, en certa manera, és causa de l'efecte desmagnetitzant que, com veurem, l'induït produeix en el camp.

Hom ha proposat molts de procediments per a calcular la inductància, basant-se en les dimensions de l'induït, forma de les ranures, etc., però el càlcul és molt complicat, i els resultats no són massa segurs. Prescindirem aquí del càlcul de la inductància, però direm alguns dels seus efectes i alguns dels factors dels quals depèn.

En general, els induïts amb poques bobines de grans dimensions i de moltes espises, situades en ranures grans, tenen molta més d'inductància, a proporció, que els induïts amb enrotllament repartit. Això fa que l'enrotllament repartit sigui preferible al concentrat, àdhuc i essent menor el seu factor de repartiment (núm. 10).

16. *Maneres de disminuir la inductància de l'induït.* — La inductància de les bobines pot ésser dividida en dues parts: la part corresponent als caps de les bobines i la corresponent a la part situada dins les ranures.

En general, aquesta última és més important, però en màquines de gran pas polar i induïts molt estrets els caps poden ésser més llargs que les parts contingudes a les ranures, i arribar a tenir una inductància igual o major.

La fig. 9 *a* mostra una ranura en secció transversal, que conté un grup de conductors que

constitueixen un costat d'una gran bobina de vint-i-vuit espises. Quan el corrent circula per la bobina, es forma un camp magnètic que rodeja l'agrupament, com indiquen les línies de punts. La força electromotriu d'autoinducció, en el que es refereix a la part de la bobina de la ranura, depèn de la intensitat del camp local i del nombre de vegades que el volta la bobina. El camp local depèn del corrent que circula pels conductors de la bobina, del nombre d'espises, i de la reluctància magnètica de l'espai que rodeja el costat de la bobina. Per a una reluctància donada, la força electromotriu d'autoinducció, per un corrent determinat, és proporcional al quadrat del nombre d'espises de la bobina, o conductors per ranura. La inductància pot disminuir-se, per tant, repartint la bobina en dues o més seccions col·locades en ranures separades, reduint d'aquesta manera el nombre de conductors per ranura.

17. Amb un exemple veurem això més clarament. Si tenim un induït amb vuit bobines de trenta espises cada una, cada una de les quals té una

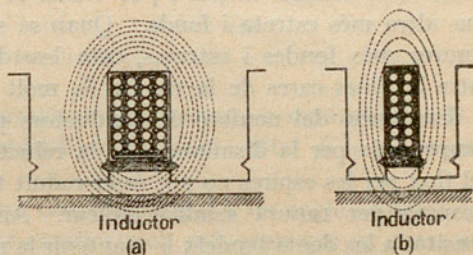


FIG. 9

inductància de 0,01 henri, la inductància total serà de  $0,01 \cdot 8 = 0,08$  henris. Si en lloc d'aquest enrotllament en fem un altre de setze bobines de quinze espires cada una en la mateixa forma i disposició, suposant igual reluctància dels circuits magnètics, essent el mateix el nombre d'espires total, llavors, com que el nombre d'espires de cada bobina és meitat, la inductància per ranura serà la quarta part, o sigui  $\frac{1}{4} \cdot 0,01$  henris per ésser meitat el nom-

bre de conductors per ranura, i disminuir amb el seu quadrat la reluctància; i com que el nombre de ranures és 16, la inductància total serà  $\frac{1}{4} 0,01 \cdot 16 = 0,04$  henrys, o sigui la meitat que en el cas anterior.

En aquest exemple havem suposat que la reluctància del circuit magnètic a l'entorn de la bobina és la mateixa per la bobina gran que per la petita. Però en la pràctica no succeeix així, i la reducció de la inductància per la subdivisió de l'enrotllament no és tan gran com s'indica teòricament a l'exemple anterior. A la fig. 9 a la més gran part de la reluctància és deguda als espais d'aire que estan a la vora de l'obertura de les ranures, i amb una ranura ampla i poc fonda la reluctància és més gran que amb una altra més estreta i fonda. Quan se subdivideixen les bobines cal usar ranures més fondes i estretes, com les de la figura 9 b, i la reluctància entre les dues cares de la ranura és molt més petita. El resultat és que la disminució del nombre de conductors per ranura pot ésser en gran part compensada per la disminució de la reluctància, de manera que el producte del flux per les espires no pot ésser reduït tant com la disminució del nombre d'espires per ranura sembla indicar. Amb les ranures estretes la major densitat a les dents tendeix a mantenir la reluctància, però no és tan corrent l'ús de dents saturades en els alternadors com a les màquines de corrent continu. Degut a l'augment del nombre de bobines i a la disminució de la reluctància del camí del flux del camp local al voltant de les bobines, la subdivisió de l'enrotllament redueix la inductància total una mica menys que en proporció directa de la reducció del nombre d'espires per bobina; però en màquines en què es desitja poca inductància de l'induït i un factor de regulació petit, l'enrotllament es fa repartit, en la forma indicada.

Una altra raó que és a favor de la distribució de l'enrotllament és que s'obté una forma d'onda més aproximada a la sinusoidal de la que pot obtenir-se amb un enrotllament concentrat.

18. *Efectes del factor de potència en la caiguda de tensió.* — El factor de potència del circuit exterior d'un alternador també produeix una variació important de la caiguda de tensió per efecte de la impedància de l'induït.

Per exemple : si un alternador subministra un corrent donat amb un factor de potència baix, una mateixa impedància de l'induït de l'alternador causa una caiguda de tensió més gran que si l'alternador produeix el mateix corrent amb un factor de potència més elevat.

La raó de tot això es descobreix clarament als diagrames de la fig. 10.

A la fig. 11 a el corrent  $oi$ , que al diagrama de la fig. 8 estava en fase amb la tensió als borns, en ésser la càrrega no inductiva, ve retardat respecte la tensió als borns  $U = oa$  d'un angle  $\varphi$ . Sumant ara a  $U$ , tensió als borns, la caiguda de tensió  $vb$  deguda a la resistència de l'induït, d'una valor  $rI$ , paral·lelament al corrent, i la caiguda  $be$  corresponent a la reactància de

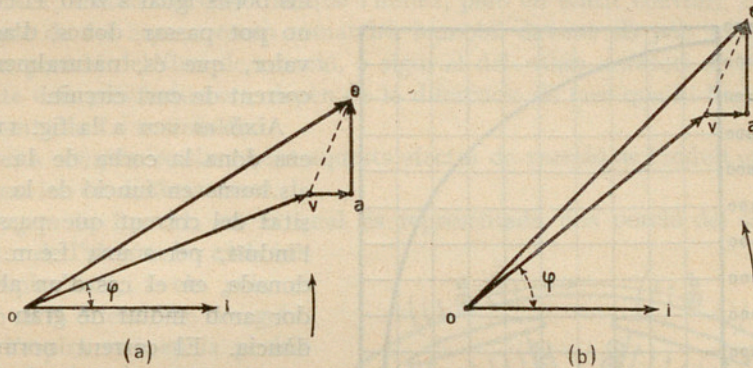


FIG. 10

l'induït d'una valor  $2\pi \sim LI$ , normalment al corrent, o sigui sumant-li la caiguda total d'impedància  $ve$ , obtindrem la f.e.m. total  $E = oe$  engendrada a l'alternador.

La fig. 10 b ens dóna la mateixa construcció per a un angle de decalatge entre la tensió als borns i el corrent exterior molt més gran que en el cas anterior, és a dir, per a un factor de potència  $\cos \varphi$  del circuit exterior molt més petit. Es veu ben clarament que la f.e.m. total induïda  $E = oe$  és considerablement més gran que en el cas anterior, i la intensitat del corrent i la tensió als borns són els mateixos en cada cas.

La raó d'això és que quan l'alternador treballa amb un factor de potència baix o sigui amb un angle  $\varphi$  gran, la f.e.m. necessària per a vèncer la impedància de l'induït resulta aproximadament de la mateixa direcció que la de la f.e.m. total engendrada, i, per tant, la diferència vectorial és gairebé la diferència numèrica de les seves valors absolutes, mentre que quan el factor de potència és alt la f.e.m. necessària per a vèncer la impedància de l'induït ve gairebé en angle recte amb la f.e.m. total induïda, i, per tant, el restar-la geomètricament té un efecte de molta menys d'importància.

#### EFFECTES D'UNA GRAN IMPEDÀNCIA DE L'INDUÏT

19. Els alternadors, l'induït dels quals té una gran inductància, poden posar-se en curt circuit sense gran perill de cremar-se.

Quan un alternador d'aquesta mena és curtcircuitat el corrent no assolix una valor tan alta com a les màquines de corrent continu, perquè la f.e.m. engendrada s'utilitza a vèncer la inductància, sense que el corrent pugui assolir una valor molt gran.

En un alternador amb gran impedància, quan el corrent creix, la caiguda de tensió creix molt ràpidament, i per un corrent donat s'arriba a una tensió

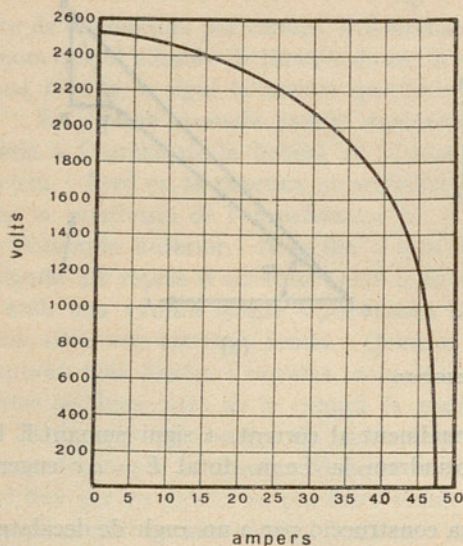


FIG. II

als borns igual a zero; el corrent no pot passar, doncs, d'aquella valor, que és, naturalment, el corrent de curt circuit.

Això es veu a la fig. II, que ens dona la corba de la tensió als borns en funció de la intensitat del corrent que passa per l'induït, per a una f.e.m. total donada, en el cas d'un alternador amb induït de gran impedància. El corrent normal de càrrega d'aquesta màquina és de 25 ampers, i es veu a la figura com en créixer la intensitat del corrent la tensió als borns disminueix ràpidament, per augmentar la caiguda de tensió deguda a la impedància de l'induït, fins que cap als 47 ampers la caiguda de tensió val la f.e.m. total

induïda, i la tensió als borns arriba a zero. En posar en curt circuit aquest alternador, el corrent val, doncs, uns 47 ampers. Una màquina d'aquesta naturalesa probablement no es perjudicaria per un curt circuit, ja que l'induït pot resistir per algun temps la càrrega de 47 ampers sense perill d'escalfar-se massa.

Amb tot i això, aquestes màquines no són molt acceptables, per la impossibilitat d'una bona regulació de la tensió, donat que varia molt per petits canvis de corrent.

#### EFFECTES MAGNÈTICS DEL CORRENT DE L'INDUÏT

20. *Efectes de la reacció de l'induït.* — El corrent que circula per l'induït, a més de produir una caiguda de tensió per causa de la seva impedància, produeix un flux, que en reaccionar amb el camp magnètic dels inductors altera la magnitud i distribució del flux inductor, en una forma que depèn

de l'angle de decalatge que hi ha entre el corrent i la f.e.m. Aquests dos efectes es coneixen amb el nom de *desmagnetització i distorsió del flux inductor*.

El flux de reacció de l'induït d'un alternador polifàsic té una valor constant i una posició fixa respecte dels pols inductors. En efecte, els corrents en circular pels enrotllaments de l'induït creen un camp magnètic rotatori que girarà la mateixa velocitat que l'induït, però en sentit contrari, de manera que de fet aquest camp romandrà immòbil davant els pols inductors.

La posició del flux de reacció, o sigui el del camp rotatori de l'induït respecte dels pols inductors, depèn de la diferència de fase que hi hagi entre el corrent i la f.e.m. induïda.

Per a comprendre clarament aquests efectes de reacció de l'induït anem a analitzar-los en distints casos.

Vegem la fig. 12, en la qual és representada una porció del sistema inductor de l'alternador amb una sola espira *ab*, i els pols es mouen en la direcció de la sageta.

Quan l'espira està en la posició dibuixada el flux que la travessa és el mínim, i, per tant, és màxima la f.e.m. induïda. La direcció de la f.e.m. induïda ve indicada per  $\odot$  en el conductor on el corrent ve de darrera a davant, i per  $\oplus$  en el conductor on va de davant a darrera, respecte al pla del paper.

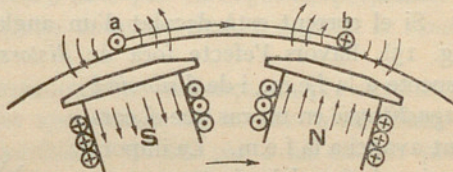


FIG. 12

Suposem que l'alternador alimenta un circuit no inductiu. Aleshores el corrent estarà en fase amb la f.e.m. engendrada a l'espira, i tindrà, al mateix temps que la f.e.m., la seva valor màxima.

La direcció del camp produït pel corrent de l'induït vindrà representada, segons la llei del tirabuixó, pels cíclics amb sagetes a l'entorn dels conductors de l'espira.

Fixant-nos en el pol *S* veiem que el flux de l'induït augmenta el flux del camp a l'esquerra del conductor, disminuint-lo a la seva dreta, i, per tant, equival a desplaçar-lo més cap a l'esquerra. El mateix succeeix amb el pol *N*, i, per tant, es veu clarament que el camp resulta desviat en direcció contrària del moviment de l'inductor. En aquest cas, doncs, l'efecte de la reacció de l'induït és una *distorsió del camp*.

Si suposem ara que l'alternador alimenta un circuit inductiu, els efectes seran molt diferents.

A la fig. 13 és representat el cas en què el corrent ve retardat de  $90^\circ$  respecte a la f.e.m. induïda.

En aquest cas, quan el corrent obté la seva màxima valor, els pols han avançat ja de  $90^\circ$  elèctrics des de la posició corresponent a l'instant que

és màxima la f.e.m. a l'espira, i el centre de l'espira correspon exactament a un pol S.

Es veu ara clarament, conservant les mateixes notacions d'abans, que l'afecte és de *simple desmagnetització* del camp per ésser directament oposats els flux produïts pel camp i per l'espira.

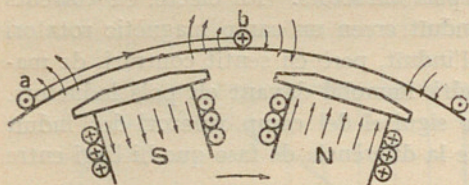


FIG. 13

Si el corrent vingués avançat de  $90^\circ$  respecte la f.e.m., llavors el punt de màxima intensitat de corrent correspondria a l'instant que un pol N es trobés exactament en front del centre de l'espira (fig. 14), i llavors els fluxos del camp i de l'induït vindrien en la mateixa direcció. En el tal cas, com que els fluxos són del mateix sentit l'efecte fóra de *simple magnetització* o reforç del camp.

Si el corrent està decalat d'un angle menor de  $90^\circ$  respecte a la f.e.m. (fig. 15), llavors l'efecte fóra de *distorsió i desmagnetització* si és retardat respecte a la f.e.m., i de *distorsió i magnetització* en un cas que el corrent avanci a la f.e.m. La importància relativa dels efectes esmentats depèn de l'angle de decalatge corresponent, essent l'efecte desmagnetitzant proporcional al sinus del dit angle; així, quan el corrent és en fase amb la f.e.m.,

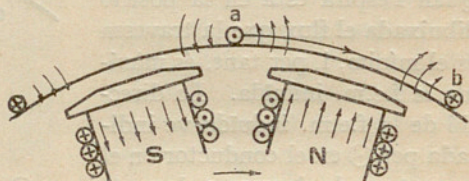


FIG. 14

l'angle de retard és zero, el seu sinus és zero i l'efecte desmagnetitzant és nul; quan el retard és de  $90^\circ$ , el sinus és 1, i l'efecte desmagnetitzant és màxim.

Aquests resultats poden resumir-se com segueix:

a) Quan un alternador treballa amb càrrega no inductiva l'efecte de la reacció de l'induït consisteix en una distorsió del flux del camp, desviant-lo en direcció contrària del moviment de l'inductor.

b) Quan un alternador treballa amb un corrent retardat de  $90^\circ$  respecte a la f.e.m. induïda, l'efecte de la reacció de l'induït és simplement desmagnetitzant.

c) Quan un alternador treballa amb un corrent avançat de  $90^\circ$  respecte a la f.e.m. induïda, l'efecte de la reacció de l'induït és simplement magnetitzant, i reforça el camp.

d) Quan un alternador treballa amb un corrent retardat d'un angle

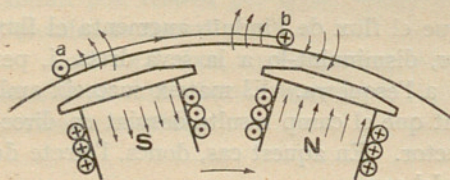


FIG. 15

menor de  $90^\circ$  respecte a la f.e.m. induïda, l'efecte de la reacció de l'induït és alhora de desmagnetització i distorsió del camp magnètic, en proporcions que depenen del sinus de l'angle de decalatge. Aquest és el cas més corrent a la pràctica.

e) Quan l'alternador treballa amb un corrent avançat d'un angle menor de  $90^\circ$  respecte a la f.e.m. induïda, l'efecte de la reacció de l'induït és de magnetització i distorsió simultànies, en proporcions que depenen del sinus de l'angle de decalatge.

21. *Intensitat del camp de l'induït.* — La reacció de l'induït té un paper important en el càlcul de màquines de corrent continu, ja que, si és excessiva, el camp magnètic pot ésser desviat o debilitat de tal manera que doni lloc a la formació de guspires als carbons del commutador. Als alternadors no hi ha el perill de les guspires, però l'afebliment del camp produeix una disminució de la tensió, i pot, per consegüent, perjudicar la regulació. Per això cal conèixer l'efecte desmagnetitzant degut a la reacció de l'induït.

Abans de calcular l'efecte desmagnetitzant començarem per determinar la fórmula següent, que dona la valor aproximada del nombre total d'ampervoltes de l'induït d'un alternador polifàsic, i és útil per a fer càlculs preliminars, quan encara no es coneixen les dimensions exactes dels pols.

Si fem

$I$  = la intensitat del corrent en els fils de l'induït;

$m$  = nombre de fases;

$N_{pf}$  = conductors per pol per fase;

Aleshores:

$$M_a = \text{ampervoltes de l'induït per pol} = \frac{m}{2} \sqrt{2} \frac{I}{2} N_{pf} = 0,355 m N_{pf} I \quad (1)$$

fórmula deduïda tenint en compte que els ampervoltes de cada fase corresponents a un pol  $\frac{I}{2} N_{pf}$  creen un camp. Els  $m$  camps alterns, creats per les  $m$  fases, com que estan decalats entre ells a l'espai de  $m$  graus elèctrics originen un camp rotatori resultant, la intensitat del qual és  $\frac{m}{2}$  vegades la intensitat màxima d'un dels camps.

En realitat, el nombre d'ampervoltes de l'induït depèn del tipus de l'enrotllament de l'induït en relació amb els pols. També depèn de la relació de l'arc polar al pas polar.

Aquesta fórmula és més complicada, però més aproximada que la (1), i cal aplicar-la un cop s'ha triat l'enrotllament i la forma dels pols per a una màquina determinada.

De manera que podem escriure:

$$M_a = 0,45 f_1 f_2 m N_{pf} \cdot I \quad (2)$$

En la qual  $m$ ,  $N_{pf}$  i  $I$  tenen el mateix significat que abans,  $f_1$  és el *factor de repartiment* (TAULA II) de l'enrotllament de l'induït, i  $f_2$  és un altre coeficient que depèn de la relació de l'arc polar al pas polar; les seves valors són donades en la taula següent:

TAULA III

Arc polar Pas polar	0,5	0,6	0,7	0,8
Valors de $f_2$ . . . .	0,9	0,855	0,81	0,75

22. *Ampervoltes desmagnetitzants de l'induït.* — Pel que havem dit al núm. 20, per a determinar la valor aproximada de l'acció desmagnetitzant dels ampervoltes de l'induït podem usar la fórmula.

$$M_d = 0,355 m N_{pf} I \sin \varphi$$

en la qual  $M_d$  és el nombre d'ampervoltes desmagnetitzants per pol,  $\varphi$  l'angle de retard entre el corrent i la força electromotriu induïda, que és igual a l'angle del qual el centre del pol és separat dels conductors quan el corrent d'aquests assoleix la seva màxima valor.

Aquesta fórmula és deduïda de la (1), que dóna els ampervoltes totals de l'induït, i hi és tingut en compte que l'angle que fan dos pols consecutius del mateix nom és de  $360^\circ$ .

De la mateixa manera, i pel que ha estat dit abans, trobarem amb més d'exactitud la valor dels ampervoltes desmagnetitzants de l'induït per derivació de la fórmula (2):

$$M_d = 0,45 m N_{pf} I f_1 f_2 \sin \varphi$$

Si tenim en compte que en aquestes quatre fórmules el nombre d'espines per pol i per fase multiplicat pel nombre de fases és igual al nombre d'espines o de conductors per pol, o sigui que  $N_{pf} \cdot m = N_p$ , resulta que les podem transformar com segueix:

$$\text{Ampervoltes de l'induït per pol} \dots \dots \dots M = 0,35 N_p I \quad (1)$$

$$\text{» desmagnetitzants per pol} \dots \dots \dots M_d = 0,35 N_p I \sin \varphi \quad (2)$$

$$\text{» de l'induït per pol} \dots \dots \dots M = 0,45 N_p I f_1 f_2 \quad (3)$$

$$\text{» desmagnetitzants per pol} \dots \dots \dots M_d = 0,45 N_p I f_1 f_2 \sin \varphi \quad (4)$$

si bé les fórmules són generalment usades en aquella primera forma.

Si l'angle de retard és de  $90^\circ$ , la qual cosa succeeix aproximadament quan l'alternador suporta una càrrega fortament inductiva, que tingui un factor de potència inferior a 0,2, aleshores  $\sin \varphi = 1$  i el segon membre de la fórmula (2) s'igualava al de la (1), o sigui, que tots els ampervoltes de l'induït tenen efecte desmagnetitzant.

*Exemple.* — Un alternador trifàsic de deu pols dóna, a plena càrrega, 60 ampers en cada conductor. L'induït està connectat en estrella, i té 120 ranures, amb 18 conductors a cada una. Es demanen: a) Els ampervoltes per pol a l'induït, a plena càrrega. b) Els ampervoltes desmagnetitzants de l'induït, que s'oposen al camp, i l'angle de retard del corrent respecte a la força electromotriu induïda és de  $30^\circ$ .

*Resolució.* — a) En l'induït hi ha  $120 \cdot 18 = 2160$  conductors, o sigui  $\frac{2160}{10} = 216$  conductors per pol i  $N_{pf} = \frac{216}{3} = 72$  conductors per pol per fase.

El corrent de cada espira serà el mateix de la línia, per estar l'alternador muntat en estrella;  $I = 60$  i  $m = 3$ .

Així, doncs, per la fórmula (1):

$$\text{Ampervoltes de l'induït } M = 0,35 \cdot 3 \cdot 72 \cdot 60 = 4600.$$

b) L'angle de retard és de  $30^\circ$ , i, com que  $\sin 30^\circ = 0,5$ , tindrem:

$$\text{Ampervoltes desmagnetitzants } M_d = 4600 \cdot 0,5 = 2300.$$

Si busquéssim una solució més aproximada, coneixent la relació entre l'arc polar i el pas polar  $\frac{\text{arc polar}}{\text{pas polar}}$ , que suposarem igual a 0,7, aplicariem les fórmules (3) i (4).

La màquina té 10 pols i 120 ranures, o sigui 12 ranures per pol, i, per tant, 4 ranures per pol per fase.

La valor de  $f_1$  és 0,958 (TAULA II),

$$f_2 = 0,81 \text{ (TAULA III),}$$

$$N_{pf} = 72,$$

$$I = 60.$$

Per tant, segons la fórmula (3):

$$\text{Ampervoltes de l'induït per pol } M = 0,45 \cdot 3 \cdot 72 \cdot 60 \cdot 0,958 \cdot 0,81 = 4525.$$

i segons la fórmula (4):

$$\text{Ampervoltes desmagnetitzants per pol } M_d = 4525 \cdot 0,5 = 2262.$$

La diferència entre aquesta valor i l'aproximada és sols de 38 ampers, o sigui menys d'un 2 per cent.

## CORBES CARACTERÍSTIQUES DELS ALTERNADORS

23. La corba que lliga la força electromotriu induïda d'un alternador amb la intensitat del corrent d'excitació dels inductors se l'anomena *corba d'imantació de l'alternador*. Hi ha diverses menes de corbes d'imantació, la forma de les quals depèn de la classe de càrrega del circuit exterior.

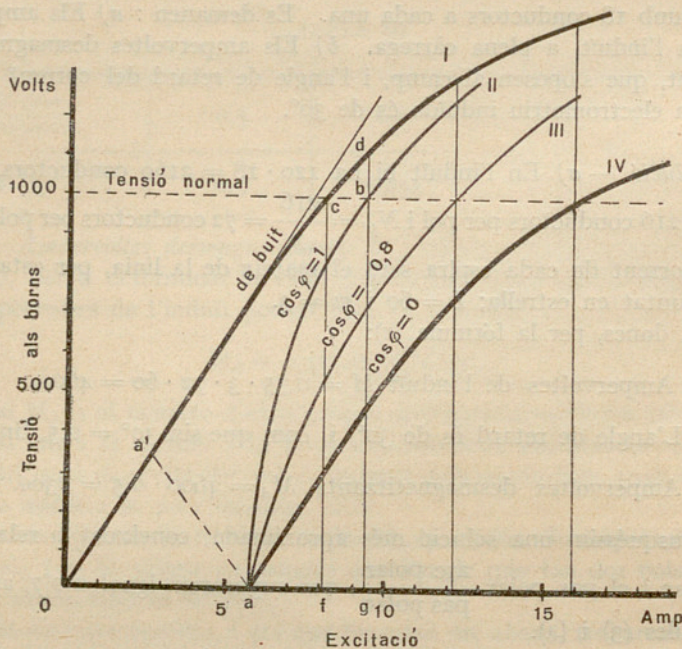


FIG. 16

24. *Característica a buit*.—Quan un alternador funciona a circuit obert o a buit la tensió als borns  $U$  la podem suposar igual a la força electromotriu induïda  $E$ , car el corrent que circula per l'induït i que excita el vòlmetre que ens mesura la tensió és insignificant. Com que, a igualtat dels altres factors, la f.e.m. induïda depèn del flux inductor, i aquest dels ampervoltes inductors, com que el nombre de voltes o d'espores dels electros és constant, la f.e.m. induïda dependrà, en definitiva, del corrent d'excitació.

La corba I de la fig. 16 representa la corba d'imantació o *característica a buit* d'un alternador. Per a traçar-la hem pres com a abscisses les intensitats  $i$  del corrent d'excitació, i com a ordenades les tensions  $U = E$  als borns de l'alternador a circuit obert. Esguardant la figura veiem que per

a obtenir la tensió normal de 1000 volts a circuit obert ens cal un corrent d'excitació de 8,2 ampers.

Com podem veure, la forma de la corba és la mateixa que la que obteníem de les dinamos de corrent continu.

25. *Característica amb càrrega no inductiva.* — Si, un cop engegat un alternador a la velocitat de règim, regulem l'excitació de manera que tancant el circuit exterior hi circuli el corrent normal de càrrega, anem augmentant el corrent d'excitació i la resistència del circuit exterior per tal de mantenir constant el corrent de càrrega, veurem com la tensió als borns augmenta amb el corrent d'excitació. La corba obtinguda és anomenada *característica a plena càrrega* de l'alternador.

D'aquesta mena de corbes en podem obtenir una per a cada factor de potència de la càrrega.

Si el circuit exterior és constituït per resistències no inductives, com són les làmpades d'incandescència, obtindrem la *característica a plena càrrega no inductiva*.

La corba II de la fig. 16 representa la característica a plena càrrega no inductiva del mateix alternador d'abans. Com que la càrrega no és inductiva el corrent del circuit exterior i la tensió als borns estan en fase, i el factor de potència del circuit exterior és la unitat.

Aquesta corba és molt interessant, car ens dóna els elements per a calcular la regulació de la tensió de l'alternador amb càrrega. En efecte, si comparem l'ordenada  $d g$  de la característica a buit amb la  $b g$  de la característica amb càrrega, corresponents a una mateixa abscissa o corrent d'excitació  $O g$ , veurem que la diferència llur  $d b$  indica la caiguda de tensió a l'induït per a la dita càrrega.

Ara, que si comparem les dues abscisses  $O g$  i  $O f$  corresponents a una mateixa ordenada  $O b$  deduirem que la seva diferència  $c b$  representa l'augment que cal al corrent d'excitació per tal que la tensió als borns a plena càrrega sigui la mateixa que quan l'alternador marxa en buit.

Per la fig. 16 veiem que per a obtenir la tensió als borns de 1000 volts a plena càrrega cal un augment de  $9,4 - 8,2 = 1,3$  ampers al corrent d'excitació.

26. *Característica amb càrrega inductiva.* — Si la càrrega de l'alternador és inductiva, això és, si conté autoinducció, veurem com la forma de les corbes obtingudes varia amb el factor de potència del circuit exterior.

Les corbes III i IV de la fig. 16 representen les característiques a plena càrrega per a diversos factors de potència. Observant-los ens adonarem que, per una mateixa tensió als borns, com més baix és el factor de potència del circuit exterior més gran és la caiguda de tensió de l'induït. Això ens diu que si, variant l'autoinducció de la càrrega, volem mantenir constant la

tensió als borns  $U$  de l'alternador cal que la força magnetomotriu dels inductors augmenti en proporció de l'autoinducció de la càrrega.

Aquest augment a la força magnetomotriu és per a produir un augment a la f.e.m. induïda  $E$ , necessària per a vèncer la reacció de l'induït i la seva impedància.

27. *Característica amb corrent del tot desvatat.*— Si determinem la característica d'un alternador amb corrent de plena càrrega i desvatat del tot respecte a la tensió dels borns, obtindrem la característica a plena càrrega i factor de potència zero.

Si observem la característica iv de corrent desvatat de la fig. 16 veurem que la seva forma és la mateixa que la de la característica a circuit obert, solament que és desplaçada respecte d'ella d'una distància  $a a'$  proporcional al corrent desvatat.

L'abscissa  $O a$  representa els ampervoltes necessaris per a fer circular per l'induït, en curt circuit, això amb tensió nul·la als borns, el corrent normal amb qualsevol factor de potència. És per això que les característiques corresponents al corrent normal per a diversos factors de potència passen totes pel mateix punt  $a$  de l'eix de les abscisses.

28. *Característica de curt circuit.*— Si posem els terminals d'un alternador en curt circuit a través d'un ampèrmetre de resistència menyspreable i excitem els inductors fins que l'ampèrmetre marqui la intensitat normal de càrrega, notarem que per a obtenir-la ens caldrà solament una fracció de la força magnetomotriu normal d'excitació, ja que quan l'induït és en curt circuit la tensió  $U$  als borns és nul·la, i la f.e.m. engendrada a l'induït és emprada totalment en vèncer la impedància de l'induït.

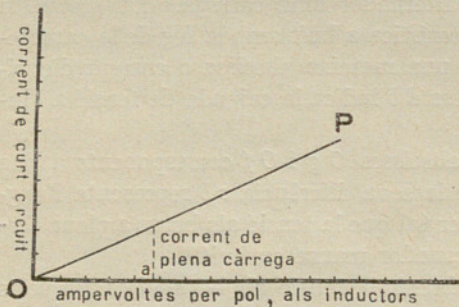


FIG. 17

Prenent com a abscisses els ampervoltes d'excitació i com a ordenades la intensitat del corrent de curt circuit, obtindrem la *característica de curt circuit* (fig. 17) de l'alternador. Fins a intensitats no gaire superiors a la normal aquesta corba és una línia recta; per a intensitats molt superiors esdevé un poc corbada.

A la fig. 17,  $O a$  representa la força magnetomotriu en ampervoltes, necessària per a fer circular per l'induït en curt circuit el corrent de plena càrrega  $I$ .

29. La intensitat del corrent de curt circuit d'un alternador pot ésser

calculat tenint en compte que als alternadors d'un mateix tipus existeix una relació fixa entre els ampervoltes per pol inductor i els ampervoltes per pol a l'induït quan està en curt circuit. Designant per  $k$  aquesta relació, i tenint present que, en curt circuit, per ésser completament desvatat el corrent de l'induït tots els ampervoltes de l'induït són desmagnetitzants i, per tant, oposats als ampervoltes inductors, podem posar la fórmula

$$N i_p = k m I_{cc} N_{pp} \quad (1)$$

en la qual:

$N i_p$  designa els ampervoltes per pol a l'inductor;

$m$  el nombre de fases;

$I_{cc}$  la intensitat, en amperes, per fase del corrent de curt circuit corresponent als  $N i_{pp}$  ampervoltes de l'inductor;

$k$  un coeficient que depèn del tipus d'alternador.

Aquest coeficient varia entre 0,85 i 0,90 per als alternadors bifàsics i trifàsics, i és determinat experimentalment un cop construït l'alternador, i serveix per als altres del mateix tipus.

La característica de curt circuit, com que és una línia recta que passa per l'origen  $O$ , basta conèixer un altre punt qualsevol  $P$  per a determinar-la.

#### DIAGRAMES DE FUNCIONAMENT DELS ALTERNADORS

30. Els diagrames que estudiarem serveixen per a saber com funcionarà un alternador un cop construït i determinar la caiguda de tensió que es produirà segons la càrrega, sense haver de fer-lo funcionar amb la veritable càrrega.

31. Havem vist al núm. 12 que la caiguda de tensió a l'induït d'un alternador era deguda: *a)* a la resistència òhmica de l'induït, *b)* a la seva inductància i *c)* a la reacció de l'induït.

Com que aquestes dues darreres causes eren degudes als efectes magnètics del corrent de l'induït, podem dir que la força magnetomotriu del corrent en circular per l'enrotllament de l'induït produeix dos efectes ben distints. Per una part, la força magnetomotriu de l'induït es combina amb la força magnetomotriu de l'inductor per a produir el flux que circula per l'induït i que produeix la f.e.m. induïda  $E$  en l'induït. Per altra part, aquesta força magnetomotriu crea un flux de dispersió  $\Phi_s$ , que es tanca dins l'induït sense travessar l'enrotllament dels inductors, el qual aminora el flux que passa per l'induït. Aquest flux de dispersió  $\Phi_s$  engendra la f.e.m. d'inductància  $E_s$  de l'induït, proporcional a un coeficient  $s$  de dispersió o d'inductància de l'induït i a la pulsació  $\omega = 2\pi \nu$  del corrent.

Així, doncs, la f.e.m.  $E$  engendrada pel flux  $\Phi$  és la resultant geomètrica de la tensió als borns  $U$ , de la caiguda de tensió òhmica  $rI$  de l'induït i la f.e.m. de dispersió  $E_s = \omega s I$ .



Quan circula corrent per l'induït cal afegir, als ampervoltes  $M_E$ , per a produir la f.e.m. induïda a buit, els ampervoltes necessaris per a contrarestar l'acció desmagnetitzant dels ampervoltes de l'induït. Els ampervoltes totals  $M_a$  de l'induït, per estar produïts pel corrent  $I$  de l'induït hi estan en fase; per tant, els podem representar per la magnitud  $Oh$  en fase amb el corrent  $Ob$ . Els ampervoltes, per a vèncer la reacció de l'induït, hauran de venir representats per un vector  $Oh'$ , igual i oposat al  $Oh$ . Component  $Oh'$  amb  $Og$  obtindrem els ampervoltes totals  $M_I$  a l'inductor per a crear la f.e.m. induïda  $E$  amb càrrega, representats pel vector  $Oi$ .

Havem vist (núm. 22) que dels ampervoltes totals  $M_a$  de l'induït solament n'hi ha una part  $M_d$  que són desmagnetitzants, part que depèn de l'angle de decalatge  $\alpha$  que forma el corrent  $I$  amb la f.e.m. induïda  $E$ , de manera que  $M_d = M_a \times \sin \alpha$ .

Segons aquesta fórmula, si tracem des d' $h'$  una perpendicular  $h'k'$  a  $Og$ , com que l'angle  $Oh'k' = \alpha$ , el segment  $Ok'$  representarà els ampervoltes desmagnetitzants de l'induït, car  $Ok' = Oh' \sin \alpha$ .

Aquests ampervoltes desmagnetitzants  $Ok'$  són els que haurem d'afegir als ampervoltes  $Og$  que donen la f.e.m.  $E$  a circuit obert.

Si portem el segment  $Ok'$  a continuació del vector  $Og$  i transportem, mitjançant l'arc  $ij'$ , la magnitud  $Oi = M_I$ , veurem que el segment  $gj' = Oj' - Og$  representa l'augment, en ampervoltes, que cal a la força magnetomotriu  $M_E$  per tal que la tensió als borns  $U$  sigui la mateixa que quan l'alternador anava a circuit obert. Com veiem, aquest augment  $gj'$  és més que suficient per a vèncer l'acció desmagnetitzant  $gk$  de l'induït.

Si descarreguem de sobte l'alternador tenint a l'excitació aquesta força magnetomotriu  $Oi$ , la tensió als borns  $U$  esdevindrà la que correspon a circuit obert per a la mateixa excitació.

La fig. 19 representa el mateix diagrama de la fig. 18, solament que havem substituït els paral·lelograms per triangles, per a major senzillesa.

33. *Diagrama vectorial per a càrrega inductiva.* — Si la càrrega és inductiva (fig. 20), com que hi ha un retard  $\varphi$  entre el corrent  $I$  i la tensió als borns  $U$ , el vector  $am$  representatiu de la caiguda de tensió òhmica  $rI$  a l'induït, com que ha d'estar en fase amb el corrent, haurà de girar al voltant

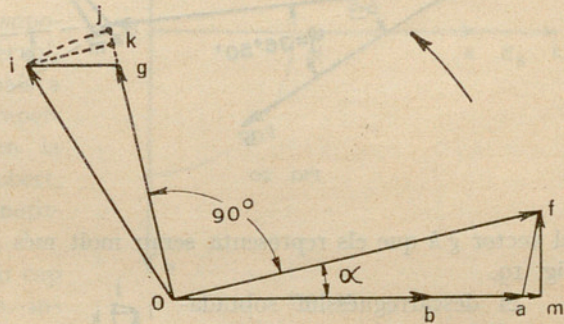


FIG. 19

de l'extrem  $a$  del vector representatiu de la tensió  $Oa$ , d'un angle  $\varphi$  junt amb el triangle  $amf$ .

Si comparem aquesta fig. 20 amb la fig. 19 veurem que la f.e.m. induïda  $E$ ,

per a una mateixa tensió, als borns  $U$ , és molt més gran que quan la càrrega no era inductiva.

Referent al triangle de les forces magnetomotrius  $Oig$ , com que els ampervoltes de l'induït han d'estar en fase amb el corrent  $I$  que els produeix, el vector  $ig$  que els representa ha d'ésser paral·lel al vector del corrent  $O b$ .

Com veiem, l'angle de decalatge  $\alpha$  entre el corrent  $I$  i la f.e.m. induïda  $E$  ha augmentat de l'angle  $\varphi$ ; els ampervoltes desmagnetitzants  $i$ , per tant,

el vector  $gk$  que els representa seran molt més grans, també, que els de la fig. 19.

Si descarreguéssim sobtadament l'alternador mantenint l'excitació  $O i$  als inductors, la tensió als borns  $U$  serà molt més gran que quan la càrrega no era inductiva, per ésser molt més gran també la força magnetomotriu a l'excitació.

34. La fig. 21 representa el diagrama corresponent a una càrrega molt més inductiva de l'alternador. Com que l'angle de retard entre el corrent i la tensió als borns és més gran que abans, la f.e.m. induïda  $E$  ha d'ésser major, i, per tant, necessitem una força magnetomotriu  $O i$  als inductors, més gran també, per a obtenir la tensió als borns  $U$ .

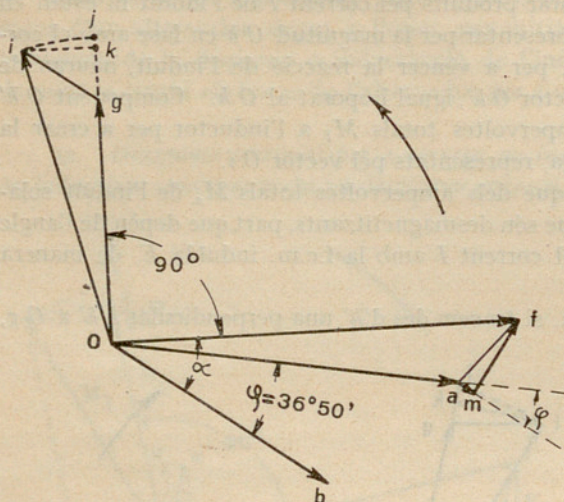


FIG. 20

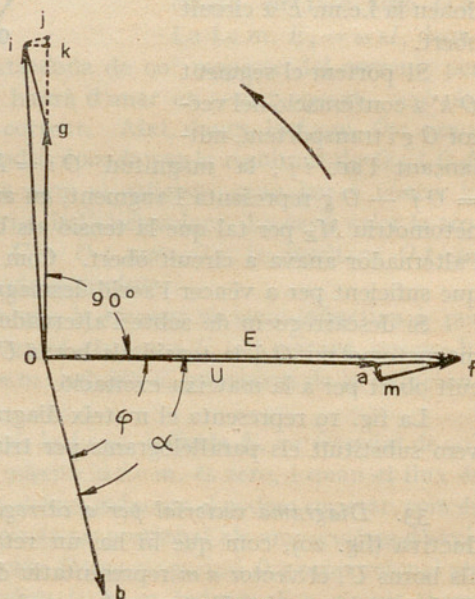


FIG. 21

35. En el cas d'ésser la càrrega completament desvatada (fig. 22),  $\cos \varphi = 0$ , i l'angle de retard del corrent  $I$  respecte de la tensió als borns  $U$ , si menyspreem les pèrdues òhmiques a l'induït, per ésser petites, serà de  $90^\circ$ . Llavors la fig. 21 es transforma en la fig. 22.

Com veiem, en ésser desvatat del tot el corrent podem suposar, sense gran error, que la f.e.m. induïda  $E$  és la suma aritmètica de la tensió als borns  $U$ , i la f.e.m. de dispersió  $E_s$ .

De la mateixa manera el triangle de les forces magnetomotrius o dels ampervoltes  $Ogi$  (fig. 21) s'ha transformat en una recta  $Oi$  (fig. 22), car l'angle  $Ogi$  de la fig. 21 val  $180^\circ$  a la fig. 22. Per tant, podem suposar, també, que els ampervoltes d'excitació  $Oi$  són iguals a la suma aritmètica dels ampervoltes  $Og$ , que produeixen la f.e.m. induïda  $E$  a circuit obert, i dels ampervoltes desmagnetitzants  $gi$  de l'induït.

El no haver de construir cap triangle per cercar la f.e.m. induïda  $E$  i els ampervoltes totals a l'excitació  $Oi$ , sols és possible quan el factor de potència de la càrrega és zero. Per ésser el de més fàcil construcció, aquest diagrama és el primer que es construeix, per a obtenir després els corresponents a altres factors de potència.

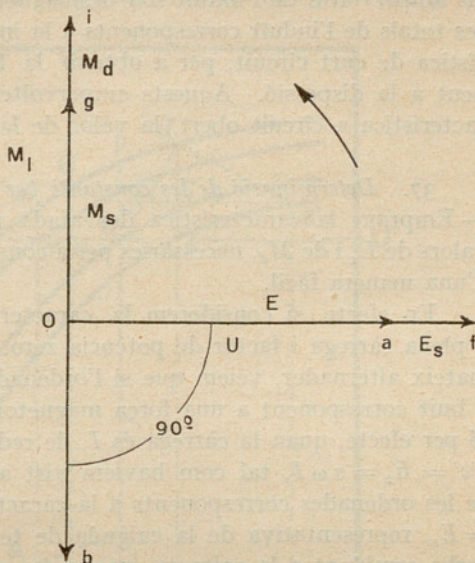


FIG. 22

36. *Determinació de les constants del diagrama.* — Com acabem de veure, per a poder construir els diagrames anteriors ens cal conèixer la f.e.m. de dispersió  $E_s$  i els ampervoltes desmagnetitzants de l'induït  $M_d$ , quantitats conegudes amb el nom de constants del diagrama de Potier, i que poden ésser determinades, com veurem.

Si es tracta d'un alternador construït podem determinar la f.e.m. de dispersió  $E_s = 2\pi \omega s I$  mesurant la valor del coeficient d'autoinducció  $s$  com si fos una inductància qualsevol, tal com hem indicat en MESURAMENTS DE CORRENT ALTERN.

Un cop determinat  $E_s$  podem cercar els ampervoltes desmagnetitzants  $M_d$  de l'induït. Aquests es determinen restant dels ampervoltes totals  $M_a$  de l'induït, donats per la característica de curt circuit, corresponents a la

intensitat  $I$ , els ampervoltes  $M_s$ , equivalents a la f.e.m. de dispersió, obtinguts de la característica a circuit obert de l'alternador.

També es poden determinar les constants, un cop es té la característica de circuit obert, calculant, mitjançant la fórmula del núm. 21, els ampervoltes desmagnetitzants de l'induït per a factor de potència zero, car tots els ampervoltes de l'induït són desmagnetitzants, i restar-los dels ampervoltes totals de l'induït corresponents a la intensitat  $I$ , obtinguts de la característica de curt circuit, per a obtenir la força magnetomotriu  $M_s$  corresponent a la dispersió. Aquests ampervoltes  $M_s$  ens donaran, damunt la característica a circuit obert, la valor de la f.e.m. corresponent  $E_s$ .

37. *Determinació de les constants per mitjà de la característica desvatada.* — Emprant la característica desvatada podem obtenir simultàniament les valors de  $E_s$  i de  $M_a$ , necessàries per a construir el diagrama de funcionament, d'una manera fàcil.

En efecte, si considerem la característica II (fig. 23) d'un alternador a plena càrrega i factor de potència zero, amb la característica a buit I del mateix alternador, veiem que si l'ordenada  $e d'$  representa la f.e.m. induïda a buit corresponent a una força magnetomotriu  $O e$ , la dispersió magnètica té per efecte, quan la càrrega és  $I$ , de reduir aquesta f.e.m. d'una quantitat  $d'c' = E_s = s \omega I$ , tal com havíem vist a la fig. 22. Per tant, si restem, de les ordenades corresponents a la característica a buit I, la quantitat  $c' d' = E_s$ , representativa de la caiguda de tensió per dispersió, obtindrem una corba semblant a la primera, que representaria la característica a plena càrrega i factor de potència zero, si no tinguéssim en compte la reacció de l'induït.

Per altra part, hem vist, a la fig. 22, que per a obtenir la tensió als borns  $U$  calia anular els ampervoltes de reacció  $M_a$  de l'induït. Afegint als ampervoltes  $M_E = O e$  d'excitació els ampervoltes de reacció a l'induït  $c' d' = e e'$  obtindrem el punt  $a'$  corresponent a la característica a plena càrrega i factor de potència zero.

Com que la intensitat de càrrega i la mantenim constant, podem suposar que també ho són la caiguda de tensió per dispersió  $M_s = c' d'$  i la reacció de l'induït  $M_a = c' a'$ . Si les magnituds  $c' a'$  i  $c' d'$  són constants, el triangle rectangle que formen  $c' d' a'$  és el mateix per a qualsevol punt de la corba, tal com el  $d$ . Aquest punt  $d$  correspon al punt  $a$  d'intersecció de la característica II, talla l'eix de les abscisses, punt que correspon al funcionament en curt circuit de l'alternador. Així, doncs, l'abscissa  $O a$  ens dóna, en ampervoltes, la força magnetomotriu necessària per a obtenir, quan la tensió als borns  $U$  és zero i el factor de potència nul, el corrent normal I.

Com que en el cas de corrent desvatat tots els ampervoltes de l'induït són desmagnetitzants, tindrem que  $M_a = M_a'$ , i si  $c a = c' a'$  representen aquests ampervoltes desmagnetitzants, el segment  $O c$  representarà la força



de les forces magnetomotrius. Fent el mateix per al punt  $d$ , observarem que els triangles obtinguts  $O a d$  i  $O' a' d'$  són iguals i que l'abscissa a l'origen  $O a$  que representa la força magnetomotriu de curt circuit es descompon en:

$c a = c' a' =$  ampervoltes de l'induit  $= M_a$  que són tots desmagnetitzants i

$O c = O' c' =$  ampervoltes equivalents a la dispersió, és a dir, els que donen a buit la f.e.m. de dispersió

$$E_s = s \omega I. = c d = c' d'$$

39. *Determinació abreujada de les constants.* — Per a obtenir les constants del diagrama sense traçar tota la característica desvatada, operarem de la manera següent:

a) Cercarem (fig. 24) la característica  $A A'$  a circuit obert de l'alternador.

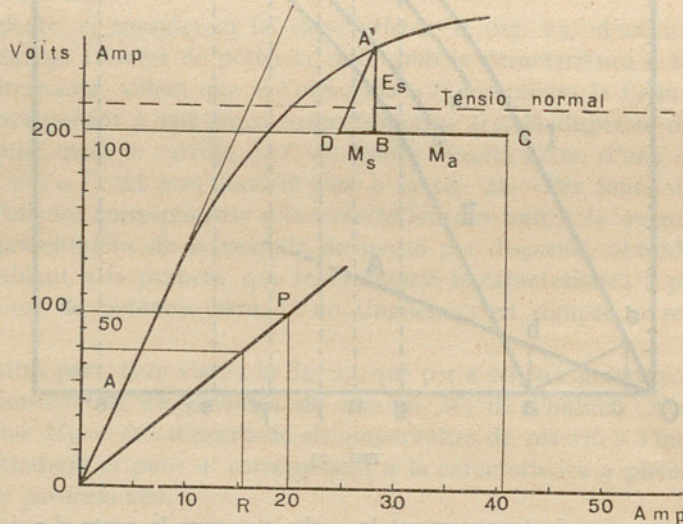


FIG. 24

b) Determinarem un punt més enllà del colze de la característica desvatada corresponent a una intensitat  $I$  de l'induit. Sigui, per exemple,  $C$  aquest punt.

c) Cercarem un punt de la característica de curt circuit de l'alternador. Sigui  $P$  aquest punt. Tracem la recta  $P O$ , que serà la característica de curt circuit. Determinem, per a una intensitat  $I$  de plena càrrega, l'abscissa  $O R$  corresponent als ampervoltes totals de curt circuit.

Tracem, pel punt  $C$ , una paral·lela a l'eix de les abscisses, i marquem-hi damunt un segment  $C D' = O R$ . Pel punt  $D'$  traçarem una paral·lela

$DA'$  al tros rectilini  $OA$  de la característica de circuit obert, fins que la talli en un punt  $A'$ .  $L'$  ordenada corresponent a  $A'$  talla la recta  $DC$  en un punt  $B$ , i tindrem

$$A'B = E_s \qquad CB = M_a.$$

Un cop determinades aquestes constants podem traçar el diagrama de Potier, el qual ens donarà la força magnetomotriu necessària perquè l'alternador doni, amb una tensió  $U$  i factor de potència donat, un corrent d'intensitat  $I$ .

Havent determinat la força magnetomotriu corresponent als inductors determinarem, mitjançant la característica a buit de l'alternador, la f.e.m. induïda que correspon a aquesta força magnetomotriu, la qual, restant-li la valor de la tensió als borns  $U$ , ens donarà la caiguda de tensió de l'alternador.

40. *Determinació de la regulació per a altres factors de potència.* — Un cop determinades les constants del diagrama es poden traçar fàcilment les característiques corresponents a altres factors de potència; només cal construir el diagrama de funcionament corresponent a cada una de les diverses valors que donem a la tensió als borns  $U$  de l'alternador.

Com que allò més general és suposar coneguda la tensió als borns  $U$ , per a determinar la força magnetomotriu als inductors cal determinar prèviament la valor de la f.e.m. induïda  $E$  que correspon a la tensió  $U$  per al factor de potència i càrrega donats.

La valor de la f.e.m. induïda  $E$  la determinarem afegint, vectorialment a la tensió, als borns  $U = Oa$  (fig. 25) la f.e.m.  $am$ , necessària per a vèncer la resistència òhmica  $r$  de l'induït, i la f.e.m. de dispersió  $E_s = \omega s I$ . La resultant d'aquestes dues, si la designem per  $af$  determinarem la seva direcció, tenint present que la component  $rI = am$  ha d'estar en fase amb el corrent, mentre l'altra component  $E_s = mf$  ha d'estar avançada de  $90^\circ$ .

La valor de  $rI = am$  la determinem per mesurament mitjançant corrent continu, mentre que la component  $E_s = mf$  la deduïm mesurant, a la fig. 23, l'ordenada  $cd$ .

Component vectorialment les f.e.m.  $Oa = U$  i  $af$  obtindrem (fig. 25) la valor  $Of$  de la f.e.m. induïda  $E$ . La força magnetomotriu necessària per a obtenir, a circuit obert, aquesta f.e.m.  $E$  la cercarem a la característica de circuit obert de l'alternador; veiem, doncs, a la fig. 23, que a una f.e.m.  $E$  li correspon una força magnetomotriu  $Oj$ .

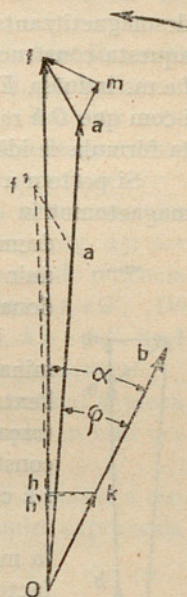


FIG. 25

Aquesta força magnetomotriu, augmentada dels ampervoltes necessaris per a vèncer la reacció de l'induït, ens donarà la força magnetomotriu als inductors.

Els ampervoltes de reacció o desmagnetitzants, com havem vist al número 22, són proporcionals al sinus de l'angle a què forma el corrent amb la f.e.m. induïda  $E$ , i es poden determinar gràficament per a un factor de potència donat, portant damunt el vector  $Ob$  del corrent una longitud  $Ok$  igual als ampervoltes totals de l'induït  $ca$ , obtinguda mesurant-la a la figura 23, i traçant des de  $k$  una perpendicular  $kh$  al vector  $Of$  representatiu de la f.e.m. induïda  $E$ .

El tros de perpendicular  $kh$  (fig. 25) ens determina els ampervoltes desmagnetitzants o de reacció de l'induït per a  $\cos \varphi$ . En efecte, segons aquesta construcció, si designem per  $\alpha$  l'angle que forma el corrent  $I$  amb la f.e.m. induïda  $E$ , tindrem al triangle rectangle  $Okh$ , que  $kh = Ok \sin \alpha$ , i com que  $Ok$  representen els ampervoltes totals de l'induït, veiem que aquesta fórmula és idèntica a la del núm. 22 que havem citat abans.

Si portem a continuació de la força magnetomotriu  $Oj$  (fig. 23) la força magnetomotriu desmagnetitzant  $jj' = kh$  obtinguda de la fig. 25, obtindrem la força magnetomotriu total als inductors  $Oj'$  per a produir la tensió als borns  $U$  amb la càrrega i factor de potència donats.

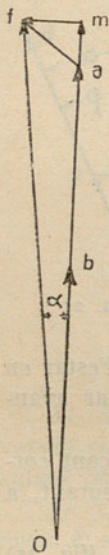


FIG. 26

El punt corresponent  $h$  de la característica (fig. 23) el determinarem buscant la intersecció de l'ordenada  $j'h$  traçada per l'extrem de  $Oj'$  amb la paral·lela  $UU$  a l'eix de les abscisses traçada per l'extrem de l'ordenada de valor  $U$ . Repetint aquesta construcció per a diversos valors de  $U$  obtindrem la característica  $sh$  corresponent al factor de potència  $\cos \varphi$ .

41. Ens podem estalviar de repetir per a cada valor de  $U$  la major part de les construccions, tenint en compte que per a un factor de potència donat la direcció del vector  $a'f$  (fig. 25) és sempre la mateixa qualsevol que sigui la valor de la tensió als borns  $U$ . Per tant, per a obtenir el punt corresponent a una altra tensió  $U_1$  només cal traçar, per l'extrem  $a'$  corresponent a  $Oa' = U_1$ , una recta igual i paral·lela a  $a'f$ . La resultant  $O'f'$  ens donarà la valor de la f.e.m. induïda corresponent  $E_1$ .

Els ampervoltes desmagnetitzants els cercarem mesurant el tros de perpendicular  $kh'$  traçada des de  $k$  a  $O'f'$ .

42. En el cas de voler determinar la característica a plena càrrega corresponent al factor de potència unitat, com que l'angle  $\varphi$  que forma el corrent  $I$  amb la tensió als borns  $U$  és nul, el diagrama de la fig. 25 prendrà la forma del de la fig. 26. Llavors el retard que hi ha entre el corrent i la f.e.m. induïda  $E$ , com que és degut únicament a la impedància de l'induït, l'angle  $\alpha$  és molt petit, així com

també ho seran els ampervoltes desmagnetitzants de l'induït, com es pot veure a la fig. 26.

Fent les mateixes operacions que hem fet per obtenir la característica per  $\cos \varphi$  obtindrem la característica  $K n'$  (fig. 25) a plena càrrega i factor de potència unitat.

Com que l'exactitud d'aquests diagrames depèn de molt de l'exactitud de les valors donades per la característica de curt circuit, cal fer diversos mesuraments per tal d'obtenir la característica de curt circuit el més exacta possible.

43. *Regulació d'un alternador.* — Un cop obtingudes les característiques es pot determinar de seguida la regulació de l'alternador per a una càrrega i factor de potència donats.

Esguardant la fig. 23 veiem que per a obtenir a circuit obert la tensió als borns  $U$  ens cal una força magnetomotriu  $O g$ . En canvi, per a obtenir la mateixa tensió a plena càrrega i factor de potència unitat cal una força magnetomotriu  $O n$ , per a un factor de potència  $\cos \varphi$ , una força magnetomotriu  $O j'$  i la força magnetomotriu  $O e$  quan el factor de potència és zero.

Si llevem sobtadament la càrrega de l'alternador bo i conservant les excitacions respectives, veurem com la tensió als borns  $U$  puja (fig. 23) per al cas de factor de potència unitat des de  $n n'$  a  $n m$ ; per a factor de potència  $\cos \varphi$ , des de  $j' h$  a  $j' p$ , i per a factor de potència zero, des de  $e f$  a  $e d'$ . De manera que els augments de tensió corresponents seran  $n' m$ ,  $h p$  i  $f d'$ , que, com veiem, són cada vegada més grans com més inductiva és la càrrega.

La relació entre aquest augment de tensió i la tensió normal a plena càrrega és denominada regulació de l'alternador, i és expressada en tant per cent de la tensió normal als borns.

Així, si designem per  $U$  la tensió normal als borns i per  $E$  la tensió a circuit obert corresponent a la mateixa excitació, la regulació vindrà expressada per la relació

$$100 \times \frac{E - U}{U}$$

La valor d'aquesta relació la podem obtenir de les característiques de l'alternador. En efecte, la regulació per a  $\cos \varphi$  serà

$$\frac{j' p - j' h}{j' h} \times 100 = \frac{h p}{j' h} \times 100.$$

#### DISPERSIÓ MAGNÈTICA ALS INDUCTORS

44. En construir els diagrames anteriors havem suposat que el flux inductor que travessava l'induït sempre era el mateix, tant si portava com

no corrent l'induït. Això no és del tot cert, car en augmentar la força magnetomotriu dels inductors, per tal de mantenir constant la tensió als borns quan circula corrent per l'induït, la dispersió magnètica entre els pols augmenta també, i la característica a circuit obert, calculada tenint en compte la dispersió corresponent a plena càrrega i factor de potència zero, pren una forma més caiguda des del colze.

Així, doncs, si volem calcular exactament la regulació d'un alternador

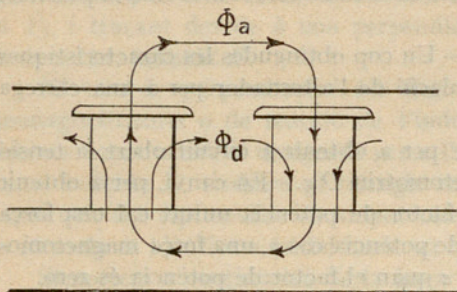


FIG. 27

hem de tenir en compte, a més de la inductància, la resistència i els efectes desmagnetitzants de l'induït, la dispersió magnètica als inductors.

El grau de dispersió d'un sistema inductor ve donat per un coeficient anomenat *de dispersió*, que expressa la relació existent entre el flux total produït pels inductors i el que veritablement travessa per l'induït. De manera, que si designem (fig. 27) per  $\Phi_i$  el flux inductor, per  $\Phi_a$  el flux que travessa l'induït i per  $\Phi_d$  el flux que es perd sense passar per l'induït, és a dir, el flux de dispersió, el coeficient de dispersió serà expressat per la relació

$$\frac{\Phi_i}{\Phi_a} = \frac{\Phi_a + \Phi_d}{\Phi_a}$$

Aquest coeficient és major que la unitat, i varia pels alternadors usuals entre 1,1 i 1,5.

Aquest coeficient de dispersió depèn de la distància que hi ha de pol a pol, de manera que les màquines de gran diàmetre amb pols curts axialment i amb força separació de pol a pol tenen un coeficient de dispersió més petit que les màquines de poc diàmetre amb els pols més llargs axialment i més junts.

#### RELACIÓ ENTRE ELS AMPERVOLTES INDUCTORS I ELS DE L'INDUÏT

45. Com hem vist, l'induït d'un alternador té una acció desmagnetitzant molt intensa damunt el camp inductor, especialment si la càrrega és inductiva, de manera que si el camp inductor no és gaire intens, per poca intensa que sigui l'acció desmagnetitzant de l'induït l'afebleix de tal manera que disturba el bon funcionament de l'alternador. Per a evitar aquest

inconvenient cal que el camp inductor sigui molt més intens que el produït per l'induït.

A les màquines modernes de 50 períodes els ampervoltes corresponents a l'entreferro per pol inductor són 2 a 2,5 més grans que els ampervoltes per pol a l'induït, i a les màquines de 25 períodes la relació és 1,25 a 2 vegades solament.

La densitat magnètica o inducció a què fem treballar l'entreferro ve limitada per la densitat o inducció de les dents de l'induït.

Si designem per  $l_e$  la longitud de l'entreferro en cm i per  $B_e$  la seva inducció en gauss per  $\text{cm}^2$ , els ampervoltes per pol als inductors necessaris per a fer passar el flux per l'entreferro seran (fórmula (2) del núm. 31 de CÀLCUL DE CIRCUITS MAGNÈTICS).

$$n i_e = 0,8 l_e B_e. \quad (1)$$

Com que els ampervoltes a l'inductor  $n i_e$  corresponents a l'entreferro depenen dels ampervoltes de l'induït, i la inducció a l'entreferro  $B_e$  és limitada per la inducció a les dents, la longitud  $l_e$  de l'entreferro ve determinada per la condició

$$l_e = \frac{n i_e}{0,8 B_e}. \quad (2)$$

La longitud de l'entreferro calculada per aquesta fórmula ens dona una valor molt més gran que la que caldria per obtenir la franquícia necessària perquè el rotor pugui girar, sense fregar, dins l'estator.

Als alternadors de gran potència acoblats directaments a turbines de vapor, com que van a gran velocitat, el sistema inductor consta d'un nombre molt reduït de pols, un o dos parells, i, per tant, el nombre d'ampervoltes per pol a l'induït és elevat, i també ho ha d'ésser el d'ampervoltes per pol a l'inductor, per tal de poder contrarestar l'acció dels de l'induït.

Així, doncs, si no es vol que la inducció a l'entreferro sigui massa forta cal que l'entreferro sigui llarg. És per això que en algunes màquines la distància radial entre l'induït i l'inductor arriba a tenir 4 i 5 cm de llargada, i fins a 7 cm en altres.

Als alternadors usuals amb sistema inductor format per un gran nombre de pols, els ampervoltes per pol a l'induït és molt més reduït que als turboalternadors, i no cal, per tant, que l'entreferro sigui tant gran, encara que sempre és major que el que caldria si només es tingués en compte les condicions mecàniques de bon funcionament de l'alternador.

## CONDICIONS PER A UNA BONA REGULACIÓ

46. Resumint el que havem dit fins ara, direm que per a obtenir una bona regulació cal:

a) Que l'induït tingui un diàmetre suficient, per tal que els pols no estiguin massa prop un de l'altre i, per tant, que el coeficient de dispersió no sigui massa elevat.

b) Que la inductància de l'induït sigui tan petita com es pugui, per tal que la caiguda de tensió, per aquest concepte, sigui feble, i que ho sigui també l'angle que forma el corrent amb la f.e.m. induïda. A aquest objecte, les entalles de l'induït no han d'ésser massa fondes ni massa estretes, i cal que subdividim l'enrotllament tant com puguem.

c) Que el camp inductor sigui molt més intens que el produït per l'induït; així, doncs, cal que la longitud de l'entreferro tingui la llargada suficient, per tal que els ampervoltes per pol als inductors puguin ésser molt més grans que els ampervoltes per pol a l'induït, sense que la inducció a l'entreferro surti dels límits normals.

d) Procurar que el circuit magnètic de l'alternador treballi, saturant certes parts del circuit magnètic, damunt la inflexió de la característica, per tal que les grans variacions que calen a la força magnetomotriu dels inductors no afectin de gaire al flux i, per tant, a la tensió als borns, com passaria si el circuit magnètic no fos saturat.

Si la màquina té un coeficient de dispersió elevat cal evitar la sobresaturació dels pols, car si no seria impossible d'obtenir la tensió normal als borns amb càrregues molt inductives, a menys d'escalfar exageradament les bobines dels inductors.

## CAPACITAT DELS ALTERNADORS

47. La capacitat d'un alternador ve limitada per dos factors : a) la caiguda de tensió i b) l'augment de la seva temperatura.

Un d'aquests dos factors és dominant en una màquina donada, segons la velocitat de rotació i el tipus d'alternador adoptat.

A les màquines de petita velocitat i gran diàmetre, amb bobines petites, ha de tenir-se en compte solament la caiguda de tensió amb càrrega inductiva, car el refredament està segurament garantitzat per la seva grandària.

En canvi, als turbo-alternadors, el límit que cal tenir present és l'escalfament de l'induït, donat que les seves dimensions són relativament reduïdes, i la inductància és petita pel fet d'haver-hi poques espirals.

La tensió màxima que pot fornir contínuament un alternador depèn

de la valor del flux als inductors, mentre que la intensitat màxima ve limitada per la pèrdua als conductors de l'induït; això és, pel seu escalfament.

Per a una tensió i intensitat determinades la potència en quilovats depèn del factor de potència de la càrrega. Com que el factor de potència és una quantitat que depèn de la instal·lació i no del constructor de la màquina, generalment la potència és donada en quilovoltampers  $kVA$ , que és el resultat de dividir per 1000 el producte de la tensió, en volts, per la intensitat en ampers, de la màquina.

## I CONSTRUCCIÓ D'ALTERNADORS

### PRIMERA PART

#### PROBLEMS

1. Un alternador té una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8. Quina és la seva intensitat nominal?

2. Per a un alternador d'una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8, calcular la seva intensitat nominal.

3. Per a un alternador d'una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8, calcular la seva intensitat nominal.

4. Un alternador té una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8. Quina és la seva intensitat nominal?

5. Per a un alternador d'una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8, calcular la seva intensitat nominal.

6. Un alternador té una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8. Quina és la seva intensitat nominal?

7. Per a un alternador d'una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8, calcular la seva intensitat nominal.

8. Un alternador té una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8. Quina és la seva intensitat nominal?

9. Per a un alternador d'una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8, calcular la seva intensitat nominal.

10. Un alternador té una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8. Quina és la seva intensitat nominal?

11. Per a un alternador d'una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8, calcular la seva intensitat nominal.

12. Un alternador té una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8. Quina és la seva intensitat nominal?

13. Per a un alternador d'una potència de 1000 kW a 10000 volts i un factor de potència de 0,8, calcular la seva intensitat nominal.

de la valor del flux als indústries, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor. A més, la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

Per a més detall, i tenint en compte les dades de la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

En quant a la indústria tèxtil, podem dir que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor, mentre que la indústria tèxtil és la que més ha augmentat en valor.

# CÀLCUL

## I CONSTRUCCIÓ D'ALTERNADORS

### SEGONA PART

### PROBLEMES

1. De què depèn la forma de la corba de la f.e.m. induïda en un alternador?

Per què l'obertura d'una bobina de l'induït no pot ésser gaire més petita que l'amplada de l'expansió polar?

2. Per què en els alternadors monofàsics amb diverses ranures per pol, uniformement espaciades, no són utilitzades totes les ranures per l'enrotllament?

3. Què s'entén per factor de repartiment d'un enrotllament d'un induït?

Per què no s'empren gairebé gens els enrotllaments concentrats?

4. En un enrotllament concentrat i d'un mateix nombre de conductors que un de repartit, la f.e.m. engendrada és més gran o més petita que en aquest darrer?

5. Què és el pas polar d'un sistema inductor i com és amidat?

Entre quins límits varia la relació entre l'arc polar i el pas polar d'un sistema inductor?

6. Quina variació hi ha en la f.e.m. d'un enrotllament repartit amb 6 ranures per pol i per fase d'un alternador trifàsic respecte d'un de concentrat del mateix nombre de conductors? Expliqueu, també, el per què.

7. A què és deguda la caiguda de tensió a l'induït d'un alternador? Què és la impedància real i què és la impedància aparent o de sincronisme? Quina de les dues és més gran?

8. Quina és la valor eficaç de la f.e.m. als borns de l'induït d'un alternador trifàsic connectat en estrella, en el qual el nombre de conductors és 3840 per fase, té 6 pols i gira a 500 revolucions per minut, si el flux per pol és de 2 000 000 de línies?

9. Com es pot disminuir la inductància de l'induït?

Quins avantatges i quins inconvenients té una gran inductància en l'induït d'un alternador?

10. Per què quan la càrrega és molt inductiva la tensió als borns és molt més petita que quan la càrrega no ho és gens? Feu un diagrama per a demostrar-ho.

11. Què s'entén per reacció en l'induït d'un alternador? Quan només hi ha distorsió al camp inductor d'un alternador? En quin cas és que l'acció de l'induït és tota desmagnetitzant?

12. L'induït d'un alternador trifàsic de 6 pols té 108 ranures amb 10 conductors a cada una; calculeu, per a una càrrega de 15 ampers : a) els ampervoltes per pol de l'induït, i b) els ampervoltes desmagnetitzants de l'induït per a  $\cos \varphi = 0,8$ . L'enrotllament està connectat en triangle.

13. Feu el mateix càlcul més exactament, sabent que la relació entre l'arc polar i el pas polar val 0,6.

14. Què entenem per regulació d'un alternador? Un alternador que a plena càrrega la seva tensió normal és 6000 volts i en descarregar-lo puja a 6800, quin és el tant per cent de regulació?

15. Un alternador trifàsic de 30 pols, 180 ranures, 12 conductors per ranura i un coeficient  $k = 0,86$ , si curtcircuitem el seu induït fins que els seus inductors donin 1500 ampervoltes per pol, quina és la intensitat, en ampers, que circularà per l'induït?

16. Què és la corba característica a buit d'un alternador? Què és la característica amb càrrega no inductiva i amb càrrega inductiva?

Què és la característica amb corrent del tot desvatat?

Què és la característica de curt circuit?

17. Traceu gràficament les cinc característiques d'un alternador donat.

18. Per què l'entreferro d'un alternador cal que sigui molt més llarg que el necessari mecànicament?

19. Què cal perquè la regulació d'un alternador sigui bona?

20. Descrïeu una manera de determinar la regulació d'un alternador per a una càrrega de factor de potència donat.

21. Quin efecte produeix en la regulació d'un alternador en saturar el seu circuit magnètic? Expliqueu detalladament la resposta.

22. Coneixent la característica a circuit obert d'un alternador, un punt de la característica de curt circuit, un punt de la característica desvatada i la resistència de l'induït, determineu el corrent d'excitació necessari per a una càrrega de 100 ampers a 1200 volts, a) quan el factor de potència del circuit exterior és la unitat, i b) quan el factor de potència val 0,8.

Apliqueu aquest problema a un alternador en el qual la característica a buit a la velocitat de règim ve donada per:

<u>Corrent d'excitació</u> <i>Ampers</i>	<u>Força electromotriu</u> <i>Volts</i>
2,2 .....	220
3,27.....	317,5
4 .....	385
6,4 .....	600
7,4 .....	690
10,3 .....	865
14,2 .....	1085
20,7 .....	1255
24,3 .....	1310
30 .....	1375

el punt de la característica de curtcircuit, amb un corrent d'excitació de 10,6 ampers, la intensitat de curtcircuit és de 186 ampers;

el punt de la característica desvatada per un corrent de 100 ampers, amb una excitació de 24,3 ampers, la tensió val 1100 volts,

i la resistència de l'induït és de 0,2 ohms.

23. Per què ve limitada la capacitat d'un alternador? De què depèn la tensió màxima d'un alternador i de la seva intensitat màxima? Un alternador de 300 quilovoltampers, quants vats dóna amb  $\cos \varphi = 0,85$ ?

24. Què entenem per coeficient de dispersió als inductors d'un alternador? De què depèn?

Als alternadors de coeficient de dispersió elevat, què cal tenir en compte en els inductors si es vol que la regulació sigui bona?

25. Traceu el diagrama de funcionament d'un alternador per a un factor de potència unitat i un altre per a factor de potència  $\cos \varphi = 0,85$ .





RF-5-34

E·E·T