

FILTRAGE DES HARMONIQUES

ET COMPENSATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

DU RESEAU 18 kV DU CERN

O. Bayard

Sommaire

- I. Récapitulation des données numériques
- II. Calcul des harmoniques du réseau
- III. Filtre proposé
- IV. Amélioration du facteur de puissance
apportée par le filtre
- V. Annexes 1 et 2.

Nota : Cette note fait suite à la note d'avant-projet MPS/PO/69-4 du 28.2.1969. Le filtre est calculé pour assurer un filtrage convenable en 1972, date à laquelle la sous-station 130 kV sera doublée. Le calcul est établi sur les prévisions de consommation et les renseignements obtenus lors des réunions de février et mars 1969.

I. RECAPITULATION DES DONNEES NUMERIQUES

Tableau 2

Récapitulation des puissances

installées en redresseurs

	Total unitaire	Total général
Actuellement : Zone Sud, Est, Neutrino, SC - 1970	24 MW	24 MW
Après mise en service des ISR et du Hall Ouest - 1971	34 MW	58 MW
Après installations expérimentales des ISR, l'extension du Hall Ouest, et la mise en service du SI - 1972	22 MW	80 MW

Tableau 3

Décomposition des puissances

installées en fonction du type de redresseurs

Nbre de phases	Décalage	Puissance installée			totale
		actuelle	1971	1972	
6	0°	3250 kW	8600 kW		
	30°	950 kW	1400 kW		
	Σ	4200 kW	10000 kW	7000 kW	21,2 MW
12	0°	2600 kW			
	15°	17200 kW	10000 kW		
	± 7°5		14000 kW		
	Σ	19800 kW	24000 kW	15000 kW	58,8 MW

Le rapport de la puissance installée des redresseurs hexaphasés à celle des redresseurs dodécaphasés va passer du chiffre actuel de 21 % à celui de 36 %, ce qui est préjudiciable au filtrage des harmoniques.

Tableau 4

Tableau des puissances installées

en moteur synchrone

Zone	M o t e u r s		Puissance totale installée	cos ϕ de fonctionnement
	nombre	puissance unit. max.		
Est	22	380 kW	8360 kW	0,8 - 0,9 capa.
	2	3200 kW	6400 kW	1
Sud	26	380 kW	9600 kW	0,8 - 0,9 capa.
	2	3200 kW	6400 kW	1
PH	1	5000 kW	5000 kW	1

Les tableaux 5, 6 et 7 suivants donnent la puissance effectivement consommée par les redresseurs. Ces chiffres, comparés à ceux des puissances installées, montrent le très faible coefficient d'utilisation des redresseurs et des génératrices alimentant les systèmes de transport de faisceaux.

Tableau 5

Prévisions de consommation sur la partie suisse du CERN (Booster exclu)

à fin 1972

Z o n e	P _a active kW	P _r réactive kVAr	P apparente kVA	cos φ
<u>EST</u> - faisceaux (génératrices)	2.106	0	2.106	1
faisceaux (redresseurs)	3.144	4.240	5.300	0,59
Ch.HBC 2 m	6.600	0	6.600	1
Ch. Gargamelle (ou Ramm)	6.000	2.800	6.600	0,905
Auxiliaires Gargamelle	3.400	2.100	4.000	0,85
Divers	1.100	1.060	1.530	0,72
TOTAL Zone Est	22.350	10.200	24.500	0,91
<u>SUD</u> - faisceaux (génératrices)	1.215	0	1.215	1
faisceaux (redresseurs)	385	1.050	1.100	0,34
Ch. Wilson + Saclay	5.000		5.000	
TOTAL Zone Sud	6.600	1.050	6.700	0,988
<u>PS</u> - Alimentation aimant	5.000	0	5.000	1
Laboratoire	400	300	500	0,80
Divers	1.300	800	1.540	0,85
TOTAL Zone PS Aimant	6.700	1.100	6.800	0,986
Total général PS + Expériences	35.650	12.350	38.000	0,94
Total Zone SC	4.400	3.300	5.500	0,80
Divers site suisse (force)	6.800	4.200	8.000	0,85
TOTAL GENERAL SITE SUISSE	46.850	19.850	51.000	0,92

Tableau 6

Prévisions de la consommation sur la partie française du CERN (Booster inclus) à fin 1972

Energie des faisceaux GeV/c	P _a active en MW à			P _r réactive en MVAR			P apparente en MVA à			cos φ à		
	21	25	28	21	25	28	21	25	28	21	25	28
ZONE OUEST												
Faisceau RF	1,28	1,83	2,28	1,96	2,10	2,10	2,34	2,80	3,13	0,55	0,66	0,73
Faisceau	1,25	1,78	2,23	1,74	1,90	1,80	2,14	2,56	2,86	0,59	0,67	0,78
Auxiliaires Ω	0,85	0,85	0,85	0,53	0,53	0,53	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85
Auxiliaires BEBC	3,40	3,40	3,40	2,10	2,10	2,10	4,00	4,00	4,00	0,85	0,85	0,85
Expérience G-2	3,20	3,20	3,20	2,40	2,40	2,40	4,00	4,00	4,00	0,80	0,80	0,80
Transfert Z.O.	3,10	4,45	5,56	4,18	4,27	4,18	5,22	6,20	6,95	0,60	0,72	0,80
TOTAL ZONE OUEST	13,08	15,51	17,52	12,91	13,30	13,11	18,50	20,40	21,90	0,71	0,76	0,80
ISR												
Aimant	7,50	10,80	13,50	5,60	8,00	10,00	9,40	13,40	16,80	0,80	0,80	0,80
Climatisation	2,30	2,70	3,15	1,40	1,70	1,95	2,70	3,20	3,70	0,85	0,85	0,85
Expériences ISR	8,00	8,00	8,00	6,00	6,00	6,00	10,00	10,00	10,00	0,80	0,80	0,80
Divers	1,20	1,20	1,20	0,75	0,75	0,75	1,40	1,40	1,40	0,85	0,85	0,85
TOTAL ISR	19,00	22,70	25,85	13,75	16,45	18,70	23,50	28,00	32,00	0,81	0,81	0,81
Supplément Transfert ISR	2,50	3,55	4,45	3,35	3,42	3,35	4,20	5,00	5,55	0,60	0,72	0,80
BOOSTER	6,00	6,00	6,00	1,50	1,50	1,50	6,20	6,20	6,20	0,97	0,97	0,97
TOTAL GENERAL SITE FRANCAIS	40,58	47,76	53,82	31,51	34,67	36,66	51,4	59,0	65,0	0,79	0,81	0,825

Tableau 7

Répartition des redresseurs

a) <u>Consommation des petites unités</u>						
Redresseurs	6 phases			12 phases		
	Nbre	P _a kW	P _r kVAr	Nbre	P _a kW	P _r kVAr
Est (faisceaux)	28	930	1.164	22	2.214	3.076
Sud (faisceaux)	5	85	193	9	300	856
Cyclotron	4	14	11	11	1.600	1.200
Ouest (faisceau RF 28 GeV)	10	535	474	13	1.740	1.631
Ouest (faisceau Ω 28 GeV)	10	550	436	12	1.685	1.361
Transfert (28 GeV)	n	6.000	4.500	n	4.000	3.000
ISR (petites Ali)	190	1.500	1.000			
ISR (expériences)	n	2.000	1.500	n	1.000	750
Booster (petites Ali)	n	1.340	660	n	660	340
T o t a l		11.925	8.570		13.200	12.200

b) <u>Consommation des grosses unités</u>			
- Alimentation Gargamelle	12 phases	6.000 kW	2.800 kVAr
- Alimentation ISR (28 GeV)	24 phases	12.000 kW	9.000 kVAr
un seul anneau	12 phases	6.000 kW	4.500 kVAr
- Alimentation expériences ISR	12 phases	5.000 kW	3.750 kVAr
- Alimentation Booster	- 4 MW pulsés - filtrés sur place		

II. CALCUL DES HARMONIQUES DU COURANT PRIMAIRE

Harmoniques d'un redresseur à p phases

On sait qu'un redresseur à p phases ne produit dans la réseau primaire que des harmoniques de courant de rang n

$$n = kp + \varepsilon \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \pm 1$$

et $k = 1, 2, 3, \dots$

Si $V \cos x$ est la tension étoile primaire, l'expression de l'harmonique de rang n est

$$i_n = I_{\text{fondamental}} \frac{\varepsilon (-1)^k}{n} \cdot \cos (nx - n\varphi - kp\theta)$$

où φ est l'angle de retard à l'allumage et où θ est l'angle de décalage entre la sinusoïde génératrice de la tension continue et la tension phase neutre primaire (θ est donné dans le tableau 1). θ ne dépend que du mode de redressement, et que du couplage du transformateur. Il apparaît dans le déphasage des courants d'harmonique par rapport au terme fondamental du courant primaire, qui est lui décalé de l'angle de retard à l'allumage φ par rapport à la tension primaire $V \cos x$.

Les redresseurs étant contrôlés, φ est une variable qui peut varier dans le même ordre de grandeur que θ . Aussi, pour simplifier, nous avons dans l'étude qui suit supposé θ identique pour tous les redresseurs, les erreurs sur θ étant supposées compensées par des variations égales de φ .

Sommation des courants d'harmoniques

Le tableau 7 donne la répartition de la consommation des redresseurs en fonction du nombre de phases. On définit à l'aide de ce tableau trois redresseurs équivalents :

- Un de puissance apparente P_1 , équivalente à la somme des petites unités à 6 phases.

$$P_1 = \sqrt{P_{1a}^2 + P_{1r}^2}$$

avec $P_{1a} = 11,9 \text{ MW}$ $P_{1r} = 8,6 \text{ MVar}$

d'où $P_1 = 14,5 \text{ MVA}$

- Un de puissance apparente P_2 , équivalente à la somme des petites unités à 12 phases

$$P_2 = \sqrt{P_{2a}^2 + P_{2r}^2}$$

avec $P_{2a} = 13,2 \text{ MW}$ $P_{2r} = 12,2 \text{ MVar}$

d'où $P_2 = 18 \text{ MVA}$

- Une de puissance apparente P_3 , équivalente à la somme des unités de grande puissance (12 phases) avec une seule alimentation des ISR en service. Deux alimentations des ISR en service simultané se comportent comme un redresseur à 24 phases. L'hypothèse précédente tient donc compte d'un déséquilibre éventuel entre les redresseurs.

$$P_3 = \sqrt{P_{3a}^2 + P_{3r}^2}$$

avec $P_{3a} = 17 \text{ MW}$ $P_{3r} = 11 \text{ MVAr}$

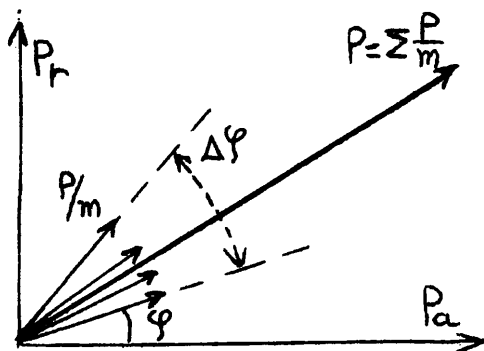
d'où $P_3 = 20,5 \text{ MVA}$

Influence de la répartition des redresseurs

Un redresseur de puissance apparente P produit un courant d'harmoniques de rang n de valeur I_n

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{1}{n}$$

Si cette puissance P est par contre fournie par m redresseurs de puissance P/m également répartis dans un angle de phase $\Delta\varphi$, le courant résultant d'harmonique I_n a alors pour valeur



$$I_n = \alpha_n \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{1}{n}$$

α_n est un coefficient de réduction dépendant de l'angle de répartition $\Delta\varphi$ et du rang n de l'harmonique.

$$\alpha_n = \frac{\sqrt{2 (1 - \cos n \Delta\varphi)}}{n \Delta\varphi}$$

La formule est établie dans l'annexe 1 et la fonction $\alpha_n = f(n \Delta\varphi)$ est représentée sur la figure 2.

Les petites unités de redresseurs du CERN sont approximativement exploitées entre $\cos \varphi = 0,92$ (25°) et $\cos \varphi = 0,65$ (55°), ce qui correspond à un angle de répartition $\Delta \varphi$ de 30° (valeur qui englobe les décalages θ possibles des transformateurs de 15° ou 30°).

En ce qui concerne les grosses unités, il est difficile de faire des hypothèses rigoureuses. Nous avons néanmoins supposé que le coefficient de réduction était le même pour les grosses unités que pour les petites, mais nous l'avons limité à au moins 0,67, ce qui revient à admettre que 2 unités sur trois peuvent être en concordance de phase.

Les valeurs du coefficient α_n tiré de la figure 2 sont données dans le tableau 8 ci-dessous.

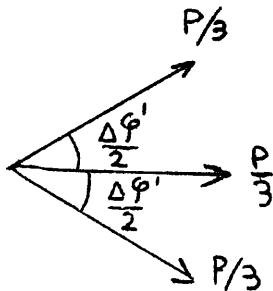
rang n	5	7	11	13	17	19	23	25
α_n - petites unités ($\Delta \varphi = 30^\circ$)	0,94	0,88	0,67	0,57	0,22	0,20	~0,15	~0,15
α_n' - grosses unités ($\Delta \varphi' = 10^\circ$ pour n < 13)	0,94	0,88	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67

Tableau 8

Coefficients de réduction

Il faut remarquer que l'hypothèse faite pour les grosses unités est relativement pessimiste. En effet, le coefficient de réduction α_n' pour 3 unités d'égale puissance répartie dans un

angle $\Delta\varphi'$ est :



$$\alpha'_n = \frac{1 + 2 \cos n \cdot \frac{\Delta\varphi'}{2}}{3}$$

Il en résulte que le choix fait pour α'_n dans le tableau ci-dessus lui fait correspondre un angle $\Delta\varphi'$ égal à 10° .

Cet angle est relativement faible, si l'on remarque que les grosses unités sont approximativement exploitées entre $\cos \varphi = 0,92$ (25°) et $\cos \varphi = 0,8$ (40°), et que d'autre part l'angle de décalage θ des transformateurs peut être 0° , $7,5^\circ$ ou 15° .

Valeur des courants d'harmoniques

Nous pouvons maintenant calculer numériquement les courants d'harmoniques :

a) Courant d'harmoniques 5 et 7

$$\sqrt{3} \cdot U \cdot I_n = \alpha_n \left[P_1 + 0,25 (P_2 + P_3) \right] \cdot \frac{1}{n}$$

Le deuxième terme $0,25 (P_2 + P_3)$ tient compte de la contribution éventuelle des redresseurs à 12 phases dans la production d'harmoniques 5 et 7 par suite de déséquilibre interne.

Harmonique 5 :

$$\sqrt{3} \cdot U \cdot I_5 = \frac{0,94}{5} \quad 24,1 = 4,55 \text{ MVA}$$

$$I_5 = 145 \text{ A}$$

Harmonique 7 :

$$\sqrt{3} \cdot U \cdot I_7 = \frac{0,88}{7} \cdot 24,1 = 3,03 \text{ MVA}$$

$$I_7 = 97 \text{ A}$$

b) Courant d'harmoniques 11 et 13

Harmonique 11 :

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{11} &= \alpha_n \left[P_1 + P_2 + P_3 \right] \frac{1}{n} \\ &= \frac{0,67}{11} \cdot 53 = 3,28 \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$I_{11} = 105 \text{ A}$$

Harmonique 13 :

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{13} &= \left[\alpha_n (P_1 + P_2) + \alpha'_n P_3 \right] \frac{1}{n} \\ &= \frac{0,57 \times 32,5 + 0,67 \times 20,5}{13} = 2,48 \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$I_{13} = 80 \text{ A}$$

c) Harmoniques de rang supérieur à 13 :

Harmoniques de rang $(2h + 1) \cdot 6 \pm 1$

$$\sqrt{3} \cdot U \cdot I_n = \frac{\alpha_n P_1 + 0,25 (\alpha_n P_2 + 0,67 P_3)}{n}$$

Harmoniques de rang $h \cdot 24 \pm 1$:

$$\sqrt{3} \cdot U \cdot I_n = \frac{\alpha_n (P_1 + P_2) + 0,67 (P_3 + 7,5 \text{ MVA})}{n}$$

Le terme 7,5 MVA tient compte de l'alimentation du 2ème anneau des ISR.

A partir de ces expressions, on peut établir le tableau des valeurs maxima prévisibles des courants d'harmoniques pouvant s'établir dans le réseau.

n	5	7	11	13	17	19	23	25
I_n	145 A	97 A	105 A	80 A	14 A	12 A	32 A	30 A
$\frac{\Delta U_n}{U}$ o/o	3,8 %	3,5 %	6,0 %	5,4 %	1,25 %	1,20 %	3,8 %	3,9 %

Tableau 9

Courants d'harmoniques et distorsion de tension

Dans le tableau 9, la valeur $\Delta U_n / U$ représente la tension relative d'harmonique n sur les barres 18 kV due à la chute de tension produite par la circulation du courant d'harmonique n dans l'impédance de connexion au réseau 130 kV.

Si P_{cc} est la puissance de court-circuit sur les barres 18 kV

$$\frac{\Delta U_n}{U} \% = 100 \sqrt{3} \frac{n U}{P_{cc}} I_n \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} U = 18 \text{ kV} \\ P_{cc} = 600 \text{ MVA} \end{array}$$

$$\frac{\Delta U_n}{U} \% = 0,52 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot I_n \quad (\text{A})$$

III. FILTRE PROPOSE

Les valeurs de la distorsion $\Delta U_n/U$ données dans le tableau 9 montrent qu'il faut filtrer en priorité les harmoniques de rang 11, 13, 5, 7, 23, 25. On peut pour cela adopter des circuits résonants pour les harmoniques de rang 5, 7, 11 et 13 qui seraient ainsi pratiquement éliminées. En adoptant pour les circuits résonants des batteries de condensateur de forte puissance, donc des bobines d'induction de faible valeur, on peut, avec les mêmes circuits, diminuer fortement la distorsion due aux harmoniques de rang 23 et 25. Un tel filtre est représenté sur la figure 1 jointe.

La capacité des condensateurs est déterminée par l'échauffement maximum admissible, provoqué par la circulation du courant fondamental et des courants d'harmoniques. D'après les normes C.E.I., le courant efficace résultant ne doit pas dépasser 1,35 fois le courant nominal du condensateur. Il en résulte la relation

$$I_n^2 + I_{\text{nominal}}^2 = (1,35)^2 I_{\text{nominal}}^2$$

d'où, pour la puissance P_{cn} du condensateur, la relation

$$P_{cn} = 1,10 \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot I_n$$

La puissance P_{cn} des condensateurs est donnée ci-dessous.
Il lui correspond une capacité C_n :

$$C_n = \frac{P_{cn}}{U^2 \cdot \omega} = \frac{P_{cn}}{100 \cdot \pi \cdot U^2}$$

La self inductance correspondante a pour valeur L_n :

$$L_n = \frac{1}{n^2 C \omega^2}$$

Résonance pour n	5	7	11	13
P_{cn} en MVar (valeurs arrondies adoptées)	5 5	3,32 3,5	3,6 3,5	2,7 3,5
C_n en μF	49	34,3	34,3	34,3
L_n en mH	8,3	6	2,43	1,74
Courant en ligne (50 Hz)	167 A	114	112	112
Courant en ligne ($n \cdot 50$ Hz)	145 A	97	105	80
Courant efficace en ligne	220 A	148	153	138
Courant eff./courant nominal C_n	1,38	1,32	0,37	1,23
V aux bornes de L_n : (50 Hz)	432 V	216 V	86 V	61 V
V aux bornes de L_n : ($n \cdot 50$ Hz)	1870 V	1280 V	885 V	565 V
Résistance des bobines <	0,15 Ω	0,15 Ω	0,15 Ω	0,15 Ω

Tableau 10

(Les tensions et courants correspondent à un montage étoile)

La distorsion $\Delta U_n/U$ de la tension due aux courants d'harmoniques est ramenée par le filtre aux valeurs données dans le tableau 11 ci-dessous.

n	5	7	11	13	17	19	23	25
$\Delta U_n/U$ ‰	0,36 ‰	0,34 ‰	0,17 ‰	0,11 ‰	0,24 ‰	0,27 ‰	0,98 ‰	1,04 ‰
Atténuation du filtre	10,4	14,2	35,4	49	5,2	4,5	3,9	3,75

Tableau 11

Distorsion après filtrage

Notons que le filtre assure pour toute la gamme des harmoniques réguliers un taux de distorsion inférieur à 1 ‰. Pour les hautes fréquences, l'atténuation du filtre (rapport entre le taux de distorsion sans filtre et avec filtre) tend vers 3,2 (pour une puissance de court-circuit de 600 MVA). Le calcul de l'atténuation est donné en annexe 2. Le taux de distorsion et l'atténuation pour les harmoniques 5, 7, 11 et 13 sont calculés pour une erreur de calage des résonances de ± 1 ‰.

Le filtre est représenté sur le schéma ci-inclus. Les bobines sont montées côté point neutre, de façon à éviter de les dimensionner pour le courant de court-circuit. L'enclenchement de la batterie a été prévu en deux étapes. La première étape consiste à insérer une bobine de 15 mH en série (éventuellement une résistance), de façon à réduire l'appel de courant à 2 fois l'intensité nominale de la batterie. Puis, après amortissement des transitoires (constante de temps de l'ordre de 20 ms), on court-circuite la self. Lors des

deux manoeuvres successives, la distorsion de la tension du réseau 18 kV, due à la circulation des courants transitoires de charge, ne dépasse pas 10 % et ne dure que quelques périodes. Le problème de l'enclenchement n'a été étudié ici que de façon très sommaire, et devra être traité plus à fond ultérieurement avec le fournisseur de la batterie.

Il y a lieu de noter que le filtre peut rester constamment connecté, car l'élévation de tension due à la batterie débitant sur le réseau 18 kV à vide est de l'ordre de

$$\frac{\Delta U}{U} \% = 100 \frac{\text{Puissance batterie}}{\text{Puissance court-circuit réseau}} = \frac{1550}{600} = 2,6 \%$$

pour autant que les trois transformateurs 130/18 kV restent couplés en parallèle.

La surface occupée par le filtre est de l'ordre de 90 m² sous une hauteur de plafond de 2 m.

IV. AMELIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE APPOREE PAR LE FILTRE

Le filtre comprend 4 batteries de condensateurs 18 kV d'une puissance réactive totale de 15,5 MVar. Une fois déduite l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation des bobines d'induction $\sum_n \frac{cn}{n^2}$, la puissance restante permet d'améliorer le cos φ

$$\sum P_{cn} = \text{Puissance restante} = 15,5 - 0,3 = 15,2 \text{ MVar}$$

Les tableaux 5 et 6 donnent les puissances consommées au CERN en 1972. En soustrayant à la puissance réactive consommée la puissance réactive fournie par la batterie de condensateur, on trouve le nouveau facteur de puissance et la nouvelle puissance apparente consommée. C'est ce qui est fait dans le tableau 12 ci-dessous.

	P_a MW	sans compensation			avec compensation			
		P_r MVar	P MVA	$\cos \varphi$	$P_r - \Sigma P_{cn}$	P MVA	$\cos \varphi$	
sur Suisse	46,9	19,9	51	0,92				
sur France	21 GeV	40,6	31,5	51,4	0,79	16,3	44	0,925
	25 GeV	47,8	34,7	59,0	0,81	19,5	51,5	0,925
	28 GeV	53,8	36,7	65,0	0,825	21,5	58	0,930
Total	21 GeV	87,5	51,4	101	0,865	36,2	94,5	0,925
	25 GeV	94,7	54,6	110	0,860	39,4	102,5	0,925
	28 GeV	100,7	56,6	115,5	0,870	41,4	109	0,925

Tableau 12

Amélioration du facteur de puissance

Le tableau ci-dessus montre que la batterie de filtrage permet de ramener le facteur de puissance du site français à la valeur moyenne du site suisse de 0,92. Cette batterie réduit aussi la charge de la sous-station 130 kV de près de 7 MVA (approximativement 7,5 % de la puissance de la sous-station). Cette considération a son importance, car si l'on se réfère aux prévisions de consommation de la division SB, la sous-station 130 kV se trouve surchargée en 1973 d'à peu près 7 %.

Remarque :

Le calcul de la batterie ne tient pas compte des harmoniques préexistants sur le réseau à vide. Des mesures ultérieures ont montré que le courant d'harmonique 5 existant dans le réseau était inférieur à 8 % du courant d'harmonique 5 calculé dans ce rapport, et que les courants de rang d'harmonique plus élevé étaient inférieurs à 5 % des courants envisagés.

Par ailleurs, il n'y a, économiquement, aucun intérêt à trop surdimensionner la batterie de condensateurs qui, à partir de 1973, date du dédoublement de la sous-station 130 kV, sera trop importante pour les équipements restant connectés sur l'actuelle sous-station. Une mesure conservatoire simple consiste à commander les bobines des circuits résonants avec plusieurs prises "sortie", de façon à pouvoir ajouter des condensateurs si la nécessité s'en fait sentir.

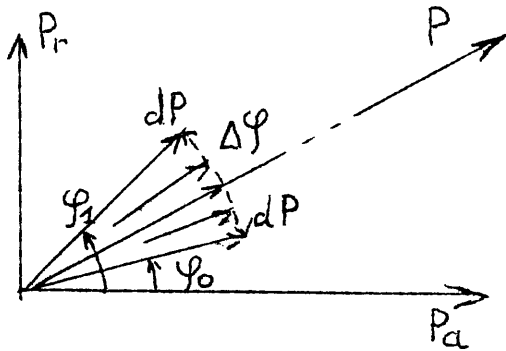
Distribution : (30 exemplaires)

MM. F. Bonaudi/ISR
R. Cartier/SB
B. Danner/MPS
M. Georgijević/MPS
B. Godenzi/MPS
H.W. Isch/ISR
H. Laporte/SB
M. Lazanski/MS
P. Loridon/SB
S. van der Meer/ISR
R. Mosig/MPS
J. Pahud/MPS
H. Reitz/MPS
J. Rouel/SB
P.H. Standley/MPS

ANNEXE 1

Sommation des courants d'harmoniques

Supposons m redresseurs de puissance unitaire identique dP , dont les angles de phase φ sont répartis de façon continue entre φ_0 et φ_1 avec un espacement $\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{m} = d\varphi$.



Si P est la somme des puissances apparentes des redresseurs, on a par redresseur :

$$dP = \frac{P}{m} = P \frac{d\varphi}{\varphi_1 - \varphi_0}$$

Pour chaque redresseur le courant i_n d'harmonique de rang n est alors

$$i_n = \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{d\varphi}{\varphi_1 - \varphi_0} \cdot \frac{\varepsilon (-1)^k}{n} \cdot \cos (nx - n\varphi - kp\theta)$$

où $n = kp + \varepsilon$ avec $\varepsilon = \pm 1$ et $k = 1, 2, 3 \dots$

En développant en sinus et cosinus, on trouve

$$i_n = \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{d\varphi}{\varphi_1 - \varphi_0} \cdot \frac{\varepsilon \cdot (-1)^k}{n} [\cos(nx - kp\theta) \cos n\varphi + \sin(nx - kp\theta) \sin n\varphi]$$

L'amplitude totale I_n de la somme des harmoniques de courant compris entre φ_0 et φ_1 est obtenue en faisant la somme, d'une

part de l'amplitude A_n des termes en cos., d'autre part de l'amplitude B_n des termes en sin.

$$A_n = \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{1}{n (\varphi_1 - \varphi_0)} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \cos n\varphi \cdot d\varphi$$

$$B_n = \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{1}{n (\varphi_1 - \varphi_0)} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \sin n\varphi \cdot d\varphi$$

Après intégration, on trouve :

$$A_n = \frac{P}{\sqrt{3} U} \frac{\sin n \varphi_1 - \sin n \varphi_0}{n^2 (\varphi_1 - \varphi_0)}$$

$$B_n = \frac{P}{\sqrt{3} U} \frac{\cos n \varphi_0 - \cos n \varphi_1}{n^2 (\varphi_1 - \varphi_0)}$$

L'amplitude I_n résultante (valeur efficace) de l'harmonique de courant de rang n est alors

$$I_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{\sqrt{2[1 - \cos n (\varphi_1 - \varphi_0)]}}{n^2 (\varphi_1 - \varphi_0)}$$

D'autre part, un redresseur unique de puissance apparente P , égale à la somme des puissances apparentes des m redresseurs unitaires, crée des courants d'harmoniques de valeur I_{no}

$$I_{no} = \frac{P}{\sqrt{3} U} \frac{1}{n}$$

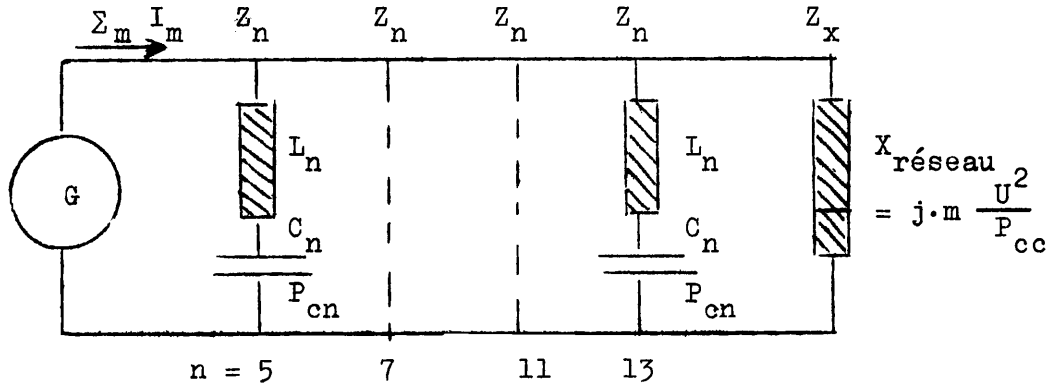
On peut alors définir un coefficient de réduction α_n entre le courant I_{no} produit par ce redresseur unique et le courant total I_n produit par les m redresseurs de puissance totale identique, répartis de façon continue dans un angle de phase $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0$. On a :

$$\alpha_n = \frac{I_n}{I_{no}} = \frac{\sqrt{2 (1 - \cos n \Delta \varphi)}}{n \Delta \varphi}$$

La variation de α_n en fonction de $n \Delta \varphi$ est donnée sur la figure 2.

ANNEXE 2

Calcul de l'atténuation du filtre



Le schéma équivalent du point de vue circulation des harmoniques est donné ci-dessus. On pose

$$Z_n = j \frac{L_n C_n m^2 \omega^2 - 1}{C_n m \omega} = j \frac{U^2}{P_{cn}} \frac{\left(\frac{m}{n}\right)^2 - 1}{m}$$

$$Z_x = j \frac{U^2}{P_{cc}} \cdot m \quad P_{cc} = 600 \text{ MVA}$$

où n est le rang de la résonance et m le rang de l'harmonique considéré.

Le coefficient de distorsion est :

$$\frac{\Delta U_m}{U} \text{ o/o} = 100 \frac{\sqrt{3} Z I_m}{U}$$

$$\text{avec } \frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_x} + \sum_n \frac{1}{Z_n} \quad n = 5, 7, 11, 13$$

Numériquement on a :

	à dm o/o de la fréquence de résonance
$Z_5 \Omega = j \cdot 65 \frac{\left(\frac{m}{5}\right)^2 - 1}{m}$	$= j \cdot 65 \frac{2 dm}{5}$
$Z_7 \Omega = j \cdot 92,5 \frac{\left(\frac{m}{7}\right)^2 - 1}{m}$	$= j \cdot 92,5 \frac{2 dm}{7}$
$Z_{11} \Omega = j \cdot 92,5 \frac{\left(\frac{m}{11}\right)^2 - 1}{m}$	$= j \cdot 92,5 \frac{2 dm}{11}$
$Z_{13} \Omega = j \cdot 92,5 \frac{\left(\frac{m}{13}\right)^2 - 1}{m}$	$= j \cdot 92,5 \frac{2 dm}{13}$
$Z_x \Omega = j \cdot 0,54 \cdot m$	

m	5(1±0,01)	7(1±0,01)	11(1±0,01)	13(1±0,01)	17	19	23	25
$Z_{\underline{5}} \Omega$	±j 0,26	+ j 8,9	+ j 22,7	+ j 29,0	+j 40,5	+j 46	+j 56,5	+j 62,5
$Z_{\underline{7}} \Omega$	-j 6,4	± j 0,265	+ j 12,3	+ j 17,4	+j 27	+j 29,2	+j 39,4	+j 43,5
$Z_{\underline{11}} \Omega$	-j14,7	- j 7,9	± j 0,168	+ j 2,84	+j 7,6	+j 9,7	+j 13,7	+j 15,5
$Z_{\underline{13}} \Omega$	-j15,7	- j 9,4	- j 2,0	± j 0,143	+j 3,8	+j 5,55	+j 8,5	+j 10
$Z_{\underline{x}} \Omega$	+j 2,7	+ j 3,78	+ j 5,95	+ j 7,0	+j 9,2	+j10,3	+j 12,4	+j 13,5
$Z_{\underline{-}} \Omega$	±j 0,26	± j 0,265	± j 0,168	± j 0,143	+j 1,76	+j 2,3	+j 3,17	+j 3,6
$\frac{\Delta U_m}{U} \%$	0,36 %	0,34 %	0,17 %	0,11 %	0,24 %	0,27 %	0,38 %	1,04 %
Atténua tion Z_x/Z	10,4	14,2	35,4	49	5,2	4,5	3,9	3,75

Tableau

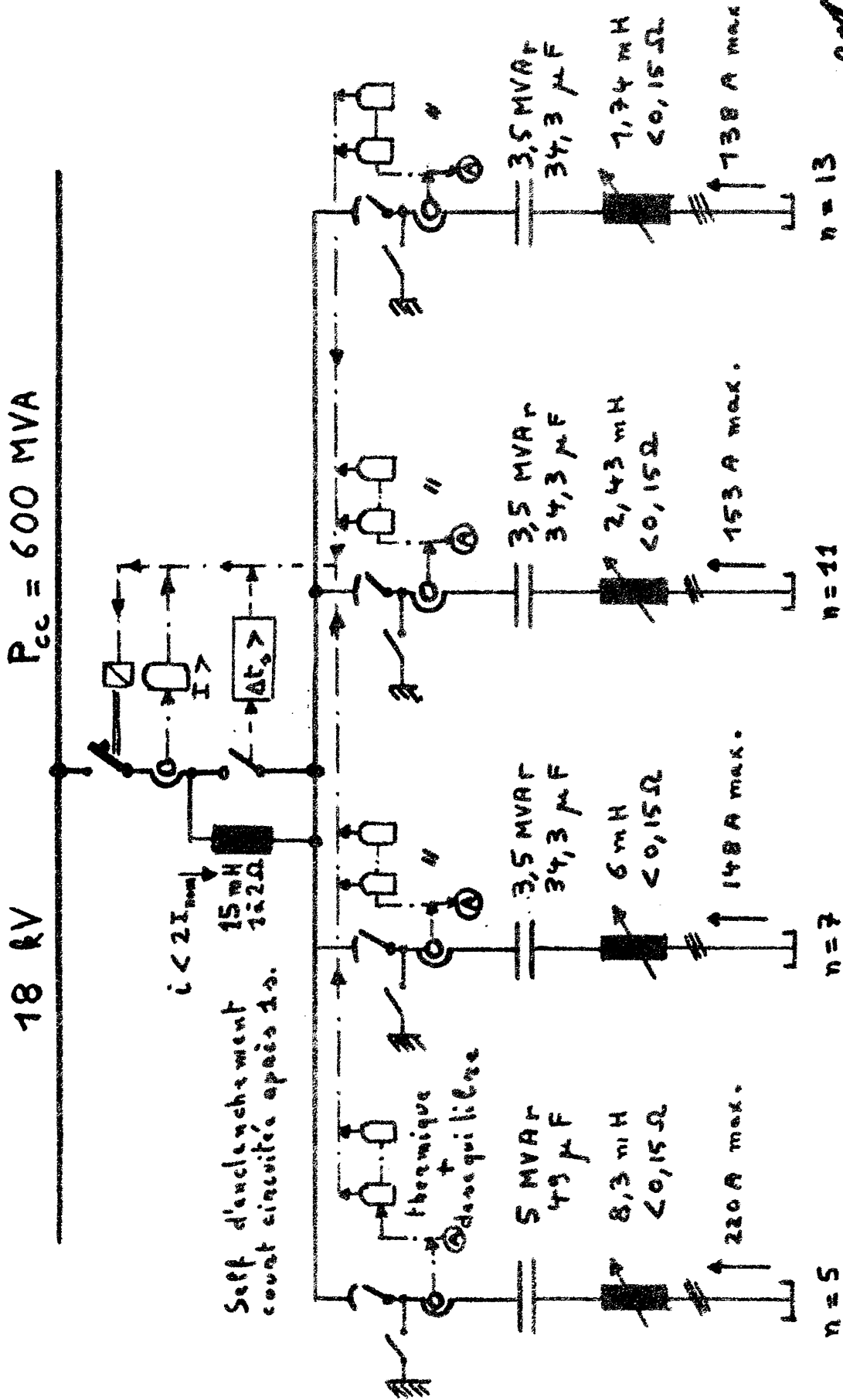
Calcul de l'atténuation du filtre

Pour des rangs d'harmoniques supérieurs à 25, l'impédance équivalente Z tend vers

$$Z \cdot \Omega \rightarrow j \cdot 0,17 m \quad \text{pour } m \rightarrow \infty$$

et l'atténuation $\frac{Z_x}{Z} \rightarrow 3,2$

FIGURE 1



[Signature]
7.5.69

filtrage des harmoniques sur le réseau 18 kV

FILTRE PROPOSE

FIGURE 2

Coefficient de réduction α_n
des harmoniques en fonction de
la repartition de la puissance
dans un angle de phase $\Delta\varphi$

$$\alpha_n = \frac{\sqrt{2(1 - \cos n \cdot \Delta\varphi)}}{n \cdot \Delta\varphi}$$

avec $n = \text{rang de l'harmonique}$

