

PARTICULARITES DU CALCUL ELECTROMAGNETIQUE DU GENERATEUR SYNCHROME AXIAL AUX AIMANTS PERMANENTS

Tudor AMBROS, Leonid IAZLOVETCHI, Daniela GULPESCU

*Université Technique de Moldavie
str.31 august 1989, 78, Chişinău Moldavie
t_ambros@moldova.cc*

Résumé. Dans la publication sont décrites les particularités du calcul électromagnétique des générateurs synchrones axiaux aux aimants permanents, sont présentées les équations de calcul et la construction du diagramme de l'aimant en régime de fonctionnement. On a décrit aussi la méthode de calcul de l'induction magnétique dans l'entrefer étant considéré l'influence de la réaction de l'indus et du flux de dispersion sur la valeur de celui-ci. On a présenté la succession du calcul de l'épaisseur nécessaire de l'aimant pour assurer la tension donnée du générateur. On a présenté quelques résultats du calcul des variantes des générateurs synchrones axiaux aux diverses combinaisons des dimensions géométriques. On a tiré des conclusions et on a donné des recommandations.

Mots clefs: générateur synchrone axial, aimants permanents, réaction de l'indus, flux de dispersion, tension, force magnétisante, tension électromotrice, entrefer.

Introduction

Les générateurs synchrones axiaux de puissance relativement petite peuvent trouver une utilisation justifiée dans des minihydrocentrales électriques au petit débit et au nombre réduit de rotations du rotor. Les générateurs électriques axiaux ont des dimensions axiales relativement petites et des diamètres relativement grands, grâce à quoi il est possible de monter sur le rotor un grand nombre de pôles. La construction du générateur devient efficiente si on monte sur le stator un enroulement aux sections circulaires, et sur les parties latérales du stator sur les deux bouts de l'arbre sont fixés deux disques rotatoires aux pôles d'aimants orientés vers le stator.

Cette construction rend possible l'économie de cuivre utilisé à la confection de l'enroulement statorique et de compenser les forces unilatérales des rotors disque et stator. Le grand nombre de pôles réduit suffisamment le nombre de rotations du rotor, ainsi on obtient la fréquence industrielle de 50 Hz sans utiliser le multiplicateur pour augmenter le nombre de rotations de la turbine d'eau. L'analyse présentée en [1] démontre que les générateurs synchrones axiaux sont beaucoup plus efficaces

que les générateurs synchrones traditionnels de construction cylindrique pour $2p \geq 10$, c'est à dire $n_1 \geq 600$ rot/min et la fréquence de 50 Hz.

Les diamètres relativement grands des rotors ont une grande inertie, et par suite de la variation de la charge ou du nombre de rotations de la turbine, celles-la atténuent la vitesse angulaire de rotation des disques rotoriques.

Les auteurs de la publication ont élaboré la construction et ont effectué le calcul électromagnétique du générateur synchrone axial à deux rotors excité par des aimants permanents. Les aimants permanents sont confectionnés en SmCo5 la marque KSP-37, la puissance du générateur $P_n = 5$ kW, le nombre de pôles $2p = 10$ et la fréquence aux bornes $f_1 = 50$ Hz.

La section transversale du générateur est présentée en [1].

La plus importante partie du générateur est présentée par les aimants permanents, c'est pourquoi le but du calcul est la détermination de la valeur optimale de l'épaisseur des aimants qui assurera les paramètres nécessaires du générateur à la sortie. Pour l'utilisation plus efficace des aimants permanents, il est nécessaire que leur épaisseur soit aussi petite

que possible, pour diminuer les flux de dispersion.

Bases du calcul du générateur

Le calcul du stator et du circuit externe du système magnétique a été réalisé conformément à la méthode présentée en [2]. Le nombre des entailles est limité par la largeur de la dent statorique. Cette largeur est imposée par les processus technologiques, $t_{zmin} = 2$ mm.

Dans les calculs on a utilisée la description approximative analytique de la courbe de magnétisation [3].

$$B(F) = B_r \frac{\Delta m \cdot H_c - F_a}{\Delta m \cdot H_c - a_d} \quad (1)$$

où B_r , H_c – l'induction rémanente et la force coercitive du matériel magnétique, Δm – l'épaisseur de l'aimant, a_d – coefficient calculé avec la relation :

$$a_d = \frac{2\sqrt{2}-1}{\gamma} \quad (2)$$

où γ - coefficient de forme de la courbe de démagnétisation.

Le point de démarrage de la ligne de retour a été déterminé pour le cas de magnétisation du système magnétique du générateur désassemblé.

Le point de démarrage de la ligne de remboursement dans ce cas correspond au flux de dispersion du générateur sans armature.

Par suite la perméance du pôle magnétique peut être déterminée avec la relation approximative [4].

$$Y_{sm} = 1,8 \cdot 10^{-6} \frac{D_{em}^2}{\Delta m} \quad (3)$$

où D_{em} – le diamètre équivalent du générateur. Et la caractéristique de l'aimant en état libre peut être décrite avec la formule :

$$B_{me}(F) = \frac{Y_{sm}}{S_m} \cdot F \quad (4)$$

où S_m – la section transversale de l'aimant.

A l'intersection de la caractéristique externe $B_m(F)$ et de démagnétisation $B(F)$ on obtient le point de démarrage de la ligne de remboursement.

L'équation de la ligne de remboursement peut être représentée comme :

$$B_{rv}(F) = B_k + \frac{B_r(1-a_d)}{H_c \cdot \Delta m} \cdot (F - F_k) \quad (5)$$

où F_k și B_k – les coordonnées qui correspondent au point „k”.

Le graphique de la caractéristique de magnétisation séparé du circuit magnétique par rapport à l'aimant est donnée dans la figure 1 comme dépendance de l'induction magnétique dans l'entrefer et la force de magnétisation $B_\delta(F)$.

La dépendance du champ de dispersion qui correspond aux aimants permanents pour la construction donnée du rotor peut être déterminée avec l'expression simplifiée.

$$B_\delta(F) = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l_\delta}{a_{pn}} \Delta m \cdot k_n \cdot F \quad (6)$$

où l_δ , a_{pn} – la longueur de l'entrefer et la distance entre les pôles.

Le coefficient k_n se calcule avec la formule :

$$k_n = 1 - \frac{\Delta_m^1}{\Delta_m} \left(2 - \frac{\Delta_m^1}{\Delta_m} \right) \quad (7)$$

où Δ_m^1 - la hauteur du pôle, qui produit seulement du flux magnétique utile. Cette dimension peut être déterminée si on connaît les limites de variation de celle-ci.

$$\Delta_m^1 = 0 \text{ si } \Delta_m^1 < 0$$

$$\Delta_m^1 = \frac{a_{pn}}{2\sqrt{2}} - \delta \text{ si } 0 < \Delta_m^1 < \Delta_m$$

$$\Delta_m^1 = \Delta_m \text{ si } \Delta_m^1 > \Delta_m$$

où δ - la valeur de l'entrefer.

La dépendance $B_\delta(F)$ est donnée dans la figure 1.

Quand on fait la somme du champ magnétique de l'entrefer $B_\delta(F)$, et de dispersion $B_\sigma(F)$ on obtient le champ magnétique à la base du pôle magnétique $B_m(F)$.

Le point d'intersection de la courbe $B_m(F)$ avec la ligne de remboursement correspond au point de fonctionnement de l'aimant en régime de marche à vide.

L'induction magnétique dans l'entrefer pour ce régime sera moindre par la valeur déterminée des flux de dispersion et correspond au point „M” de la figure 1.

L'abscisse du point „M” correspond à la force de magnétisation F_{m0} de l'aimant en régime de marche à vide.

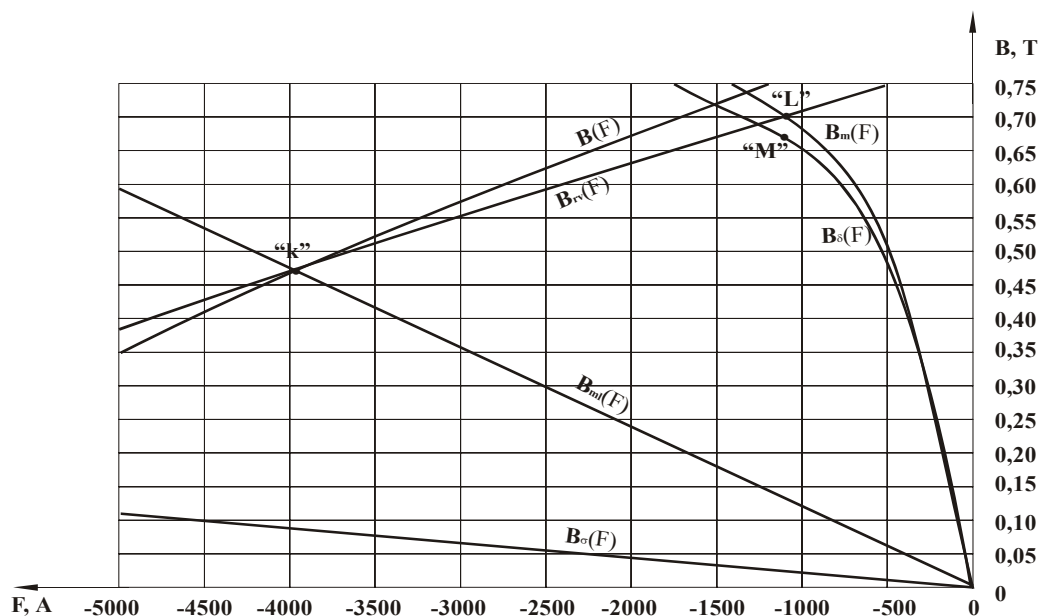


Fig.1. La diagramme de l'aimant

La perméabilité magnétique des aimants permanents est un peu plus grande que la perméabilité magnétique de l'air.

Pour le matériel magnétique SmCo5 la valeur relative de la perméabilité magnétique est :

$$m_\mu = \frac{\mu_m}{\mu_0} = 1,3 \quad (8)$$

La différence entre les perméances pour les axes longitudinale et transversale du générateur ne se distingue pratiquement pas d'après leur valeur, c'est pour quoi le générateur peut être considéré aux pôles noyés.

La réactance de l'indus pour ce cas se calcule avec la relation:

$$X_a = 2 \cdot m_1 \cdot f \cdot \frac{D_e^2 - D_i^2}{4} \cdot \frac{w^2 \cdot k_{wl}^2}{p} \cdot \frac{B_\delta}{F_{\Sigma R}} \quad (9)$$

où D_e et D_i - le diamètre externe et interne du stator, w , k_{wl} - le nombre des spires et le coefficient de l'enroulement statorique, B_δ et $F_{\Sigma R}$ - l'induction magnétique de l'entrefer et la chute de tension magnétique provoquée par le

flux magnétique de réaction de l'indus sur le circuit magnétique du générateur.

$$F_{\Sigma R} = F_{\delta mR} + F_z + F_{js} + F_{jR} \quad (10)$$

où F_z , F_{js} , F_{jR} - la chute de tension magnétique dans les dents du stator et les jougs statorique et rotorique, $F_{\delta mR}$ - la chute de tension magnétique sur le secteur du circuit magnétique entrefer - aimant, déterminé avec l'expression:

$$F_{\delta mR} = \left(\delta + \frac{\Delta m}{m_\mu} \right) \cdot \frac{B_\delta \cdot k_\delta}{\mu_0} \quad (11)$$

où k_δ - coefficient Karter. Pour déterminer l'induction magnétique sous charge on utilise la méthode complexe.

Le calcul de la composante de démagnétisation de la réaction de l'indus est effectué sur la base du diagramme des vecteurs du générateur présenté dans la figure 2.

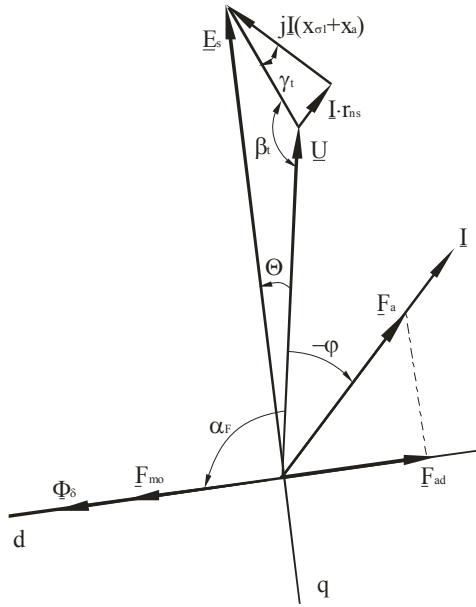


Fig.2. Le diagramme vectoriel du générateur

On admet que le vecteur de la tension aux bornes du générateur coïncide à l'axe réel. L'ordre de calcul va être présenté pour la tension nominale.

Le vecteur de la tension électromotrice, nécessaire en régime nominal:

$$\underline{E}_n = U_n + I_n [r_a + j(x_\sigma + x_a)] = E_n \cdot e^{j\Theta} \quad (12)$$

où r_a și x_σ - résistance et réactance de l'enroulement statorique.

La composante de la force de démagnétisation provoqué par la force magnétisante de l'indus:

$$F_{adn} = F_{an} \cdot \cos(0,5\pi + \Theta_n + \varphi_n) \quad (13)$$

où F_{an} - force magnétisante de la réaction de l'indus, se détermine avec l'expression:

$$F_{an} = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w \cdot k_{wl}}{p} \cdot I_n \quad (14)$$

La force magnétisante sommaire qui correspond à la charge nominale du générateur est:

$$F_{mn} = F_{m0} + F_{ad} \quad (15)$$

L'induction magnétique dans l'aimant pour ce cas peut être déterminée avec la formule (5) en remplaçant F par F_{mn} , c'est à dire:

$$B_{mn} = B_{rv}(F_{mn}) \quad (16)$$

Par analogie en utilisant la formule (6) on peut déterminer l'induction magnétique du flux de dispersion de l'aimant:

$$B_{\sigma n} = B_\sigma(F_{mn}) \quad (17)$$

L'induction magnétique dans l'entrefer:

$$B_{dn} = B_{mn} - B_{\sigma n} \quad (18)$$

La tension électromotrice de phase, qui correspond à l'induction magnétique obtenue se détermine avec l'expression:

$$E_n = 4 \cdot k_f \cdot w \cdot k_{wl} \cdot \alpha_\delta \cdot \tau_m \cdot l_\delta \cdot B_\delta \quad (19)$$

où k_f , α_δ , τ_m - coefficient de forme de la courbe du champ magnétique dans l'entrefer, le coefficient de recouvrement polaire et la valeur moyenne du pas polaire.

La valeur obtenue avec l'expression (19) de la tension électromotrice est comparable au module de la TEM E_n , obtenue avec l'expression (12). Quand ces deux valeurs coïncident, on modifie le Δ_m jusqu'au moment où elles ne coïncident.

Por préciser la valeur de la tension de phase en régime nomina, on peut utiliser la formule:

$$U_n = \Delta U_n \cdot \cos \beta_t + \sqrt{E_n^2 + \Delta U_n^2 \cdot \sin^2 \beta_t} \quad (20)$$

ou ΔU_n - le module de la chute de tension qui peut être déterminée avec l'expression:

$$\Delta U_n = I_n \sqrt{r_a^2 + (x_\sigma + x_a)^2} \quad (21)$$

β_t - l'angle entre le vecteur de la tension et la chute de la tension.

L'angle β_t se calcule avec la formule:

$$\beta_t = 0,5\pi + \varphi + \arctg\left(\frac{r_a}{x_\sigma + x_a}\right) \quad (22)$$

Les expressions (20) - (22) peuvent être utilisées pour le calcul de la tension aux bornes de l'enroulement statorique en régime différent du régime nominal et aussi pour le calcul de la caractéristique externe.

Pour ce cas, l'induction magnétique dans l'entrefer et la TEM induite dans l'enroulement statorique peuvent être déterminées en utilisant les expressions (13) - (19). L'angle Θ nécessaire à la détermination de la composante de démagnétisation provoquée par la force magnétisante de la réaction de l'indus peut être déterminée en préalable avec l'expression:

$$\Theta = \arcsin\left(\frac{\Delta U \cdot \sin \beta_t}{E_n}\right) \quad (23)$$

La simplification consiste dans le remplacement de la valeur de la TEM du régime donné avec la

valeur de la TEM qui correspond au régime nominal.

Comme la valeur de la TEM, à la variation de la charge, ne se modifie pas essentiellement, l'influence de cette simplification sur la détermination de la composante de magnétisation provoquée par la force de magnétisation de la réaction de l'indus est insuffisante.

Conformément à la méthode proposée on a réalisé quelques variantes de calcul du générateur aux diverses corrélations des dimensions géométriques. Pour toutes les variantes calculées on a gardé invariables le diamètre du conducteur de l'enroulement statorique, le facteur de puissance ($\cos\varphi=1$), le nombre des entailles statoriques ($z_1=90$) et la valeur de l'entrefer ($\delta=1$ mm).

Les calculs ont été réalisés à l'aide du programme Mathcad. Dans le tableau 1, sont présentées quelques valeurs calculées.

Tableau 1. Résultats de calcul des variantes

<i>var</i> <i>valeur</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
D_e , mm	309	306	305	300
D_i , mm	235	230	225	220
W	750	750	750	720
r_a , Ω	3,19	3,21	3,16	3,20
Δm , mm	22,0	16,0	14,5	17,0
$-F_{m0}$, A	1253	1190	1153	1113
x_{σ} , Ω	4,52	4,63	4,39	4,49
x_a , Ω	4,23	5,74	6,01	5,12
F_{an} , A	1477	1477	1418	1418
$-F_{adn}$, A	388,7	453,8	437,5	406,8
$-F_{mn}$, A	1642	1644	1590	1520
B_{m2} , T	0,704	0,672	0,665	0,689
$B_{\sigma 2}$, T	0,0775	0,0426	0,0351	0,0512
$B_{\delta 2}$, T	0,627	0,629	0,630	0,638
E_n , V	252,1	256,3	256,2	254,5
ΔU_n , V	70,7	82,4	82,5	76,9
U_n , V	219,0	219,5	219,8	219,5

Conclusions

L'analyse des résultats obtenus permet de tirer quelques conclusions et de faire les recommandations respectives:

- La saturation du circuit magnétique externe pour la tension donnée du générateur conduit à la nécessité d'augmenter l'épaisseur de l'aimant;

- L'augmentation de l'épaisseur de l'aimant conduit à l'augmentation du flux de dispersion et aussi au déplacement du point qui correspond au régime donné de fonctionnement dans la zone des tensions magnétiques énormes et le flux de dispersion devient encore plus grand.

Pour compenser la diminution de l'induction magnétique dans l'entrefer causé par l'augmentation du flux de dispersion, il est nécessaire une augmentation supplémentaire de l'épaisseur de l'aimant. En conclusion on pourrait formuler des recommandations pour le calcul des générateurs de ce type:

- Il faut calculer le générateur de telle manière que le point correspondant au régime de fonctionnement de l'aimant se trouve dans le secteur de saturation de la caractéristique externe du circuit magnétique;

- L'épaisseur minimale de l'aimant correspond à certaines corrélations entre les dimensions et les valeurs de calcul des générateurs synchrones axiaux. L'établissement des combinaisons indiquées facilite la solution du problème d'optimisation de la projection du générateur de ce type.

References

- [1] Ambros T., Câmpeanu A., Iazlovețchi L. (2004) *Generator axial pentru minihidrocentrale*, *Energetica* nr. 3, 2004, București, p.1;
- [2] Copâlov I. P. și a. (1980) *Proiectivarea electriceșii mașin*, Moscova: Energia;
- [3] But D.A. (1990) *Bescontactnâe electriceșie mașinî*, Moscova: Vâșșia școla;
- [4] Balagurov V. A., Galteev F. F., Larionov A. N. (1964) *Electricșie mașinî s postoiannâmi magnitami*, Moscova: Energia.