ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: ELEKTRYKA z. 176 Nr kol. 1500

Włodzimierz PRZYBOROWSKI[1)]

SIŁY ELEKTROMAGNETYCZNE EKSCENTRYCZNOŚCI OD POLA STOJANA ODDZIAŁUJĄCE NA WIRNIK TURBOGENERATORA

Streszczenie. W artykule przedstawiono formy elektromagnetycznych radialnych sił powierzchniowych od pola magnetycznego stojana oddziałujących na wirnik turbogeneratora, których przyczyną jest również jego ekscentryczność. Wyjaśniono przyczyny drgań wysokich częstotliwości wirników (znacznie wyższych od częstotliwości napięcia sieci energetycznej), co obserwuje się w badaniach eksperymentalnych. Uważa się, że w pewnych sytuacjach oddziaływania elektrodynamiczne są przyczyną utraty stateczności wirników turbozespołu i mogą powodować groźne w skutkach awarie.

ELECTROMAGNETIC FORCES OF ECCENTRICITY FROM STATOR FIELD INFLUENCING TURBOGENERATOR ROTOR

Summary: Forms of electromagnetic radial surface forces caused by the stator magnetic field influencing the turbogenerator rotor are presented in this paper. Those forces are created by the rotor eccentricity.
A phenomenon of generating high frequency forces (of frequencies much higher than frequencies of an electro-energetic system) is explained. That phenomenon is the reason of the rotor vibrations, which are observed in experimental tests. It is supposed that electromagnetic forces in some situations may cause the loss of mechanical stability of the considered power unit rotors, which can result in dangerous failures.

Key words: Turbogenerator, rotor, electromagnetic surface forces, eccentricity, high freguency forces

1. WSTĘP

Sprzęgnięcie wirników turbiny i generatora bloku energetycznego jest bardzo złożonym układem dynamicznym ze względu na ich kinematykę, konstrukcje i strukturę materiałową oraz złożoność obciążeń (sił i naprężeń) o różnej naturze fizykalnej (cieplne, mechaniczne, elektromagnetyczne).

Wirnik turbiny ma podstawowe znaczenie napędowe w tym układzie, bowiem stanowi napęd wirnika turbogeneratora i doznaje, oprócz bardzo złożonych oddziaływań pól cieplno-mechanicznych ze strony własnego ustroju, również oddziaływań ze strony wirnika turbogeneratora.

Do osobliwych sił oddziałujących na wirnik turbogeneratora i pośrednio na układ turbozespołu można zaliczyć oddziaływania elektromagnetyczne i elektrodynamiczne pola magnetycznego stojana turbogeneratora. Osobliwością tych oddziaływań jest to, że ich przyczyną są wyższe harmoniczne czasowo-przestrzenne pola magnetycznego w maszynie.

Uważa się, że w pewnych sytuacjach siły elektromagnetyczne i elektrodynamiczne mogą być przyczyną utraty stateczności wirników turbozespołu i prowadzić do groźnych w skutkach awarii.

Pomimo wzrostu liczby prac poświęconych problematyce dynamiki wirników, czego przykładem są monotematyczne konferencje [8], problem oddziaływań elektromagnetycznych jako przyczyn dynamiki wirników turbozespołów jest rzadko podejmowany. Na wspomnianej konferencji zagadnienia te zostały podjęte zaledwie w kilku pracach [9, 10, 11] i przede wszystkim w aspekcie mechanicznym. Spośród pozycji monograficznych dotyczących tej problematyki należy wyróżnić klasyczną już książkę Tondla [5] oraz monografię Vance [6], w których również analizowane są zagadnienia mechaniczne. Bardzo interesującymi pozycjami krajowymi są monografie [2, 7].

[1)] Dr hab. inż., Politechnika Warszawska, Warszawa Pl. Politechniki 1, tel. 660-7302

W artykule przedstawiono formy radialnych obciążeń powierzchniowych od pola magnetycznego stojana oddziałujących na wirnik turbogeneratora, których przyczyną jest również jego ekscentryczność. Przyjęto uproszczony model strukturalny turbogeneratora, nie uwzględniono bowiem, w zależnościach na siły, użłobkowania wirnika i stojana. Wyjaśniono przyczyny drgań wysokich częstotliwości wirników (znacznie wyższych od częstotliwości napięcia sieci energetycznej), które obserwuje się w badaniach eksperymentalnych.

2. SIŁY POWIERZCHNIOWE OD POLA MAGNETYCZNEGO STOJANA ODDZIAŁUJĄCE NA WIRNIK

2.1. Magnetyczne siły powierzchniowe

Punktem wyjścia do określenia obciążeń elektromagnetycznych oddziałujących na wirnik turbogeneratora jest zależność na naprężenia radialne postaci

$$p_r = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0}, \tag{1}$$

w której wyrażając indukcję magnetyczną przez przepływ Θ i powierzchniową przewodność magnetyczną Λ_δ szczeliny przywirnikowej $B_\delta = \Lambda_\delta \Theta$, otrzymuje się wzór

$$p_r = \frac{(\Lambda_\delta \theta)^2}{2\mu_0} \tag{2}$$

gdzie: $\Lambda_\delta = \mu/\delta k_C k_m$, Θ - wypadkowy przepływ turbogeneratora, δ - szerokość szczeliny przywirnikowej, k_C - współczynnik Cartera, k_m - współczynnik nasycenia.
Powyższy wzór wskazuje na zależność sił powierzchniowych od formy przestrzenno-czasowej przepływu i permeancji szczeliny przywirnikowej.

W cylindrycznym układzie współrzędnych związanym z wirnikiem funkcje przepływów magneśnicy (wirnika) i twornika (stojana) można określić odpowiednio zależnościami

$$\Theta_r = \sum_{k=1}^{\infty} \theta_{mk}^r \cos\lambda_{rk} \cdot \varphi, \tag{3}$$

$$\Theta_r = \sum_{k=1}^{\infty} \Theta_{mk}^s \sin(\omega^{s/r} \cdot t - \lambda_{sk}\varphi) \tag{4}$$

gdzie: Θ^r_{mk}, Θ_{mk}^s są amplitudami przepływów wirnika i stojana, $\omega_k^{s/r}$ jest częstością zmian pola przepływu stojana względem wirnika, φ oznacza współrzędną kątową, λ_{sk} i λ_{rk} są liczbami falowymi rozkładów przestrzennych przepływów odpowiednio wirnika i stojana.

Częstość przepływu stojana względem wirnika w układzie współrzędnych związanym z wirnikiem określona jest wzorem

$$\omega_k^{s/r} = 2\pi\left[f^r - f^s \pm 6\,k\,f^r\right]. \tag{5}$$

Jeżeli uwzględni się ekscentryczność statyczną wirnika, a więc przesunięcie osi geometrycznej stojana i wirnika ε_s oraz ekscentryczność dynamiczną ε_d, czyli przesunięcie osi obrotu wirnika względem osi geometrycznej, to wynikową szerokość szczeliny przywirnikowej można określić zależnością

$$\delta = \delta_0\left[1 - e_s\cos_\varphi - e_d\cos\left(\varphi - \omega^r t\right)\right] \tag{6}$$

gdzie δ_0 jest średnią szerokością szczeliny $e_s = \varepsilon_s/\delta_0$, $e_d = \varepsilon_d/\delta_0$, ω^r - częstość obrotowa wirnika.
Z powyższej zależności wynika, że wskutek ekscentryczności wirnika szerokość szczeliny przywirnikowej, a zatem przewodność magnetyczna jest funkcją położenia wirnika.

Jeżeli dokona się sprowadzenia układu współrzędnych na wirnik wprowadzając transformację kinematyczną postaci $\varphi^r = \omega^r t - \varphi^s$ oraz przetransformuje się funkcję przestrzenno-czasową szczeliny przywirnikowej, to otrzymuje się zależność

$$\delta^r = \delta_0\left[1 - e_s\cos\left(\varphi^r - \omega^r t\right) - e_d\cos\varphi^r\right]. \tag{7}$$

Tak więc w układzie związanym z wirnikiem ekscentryczność statyczna ma charakter funkcji przestrzenno-czasowej, a ekscentryczność dynamiczna jest funkcją położenia.

W układzie związanym z wirnikiem, przy uwzględnieniu zmienności przewodności magnetycznej szczeliny przywirnikowej wskutek ekscentryczności wirnika, naprężenia radialne mają postać

$$p_r = \frac{[\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mi}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi + \sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{s}\sin(\omega^{s/r}\cdot t-\lambda_{sk}\varphi)]^2\,\Delta_0^2}{2\mu_0\left[1-e_s\cos\left(\varphi-\omega^r t\right)-e_d\cos\varphi\right]^2} \tag{8}$$

przy czym $\Lambda_0 = \frac{\mu_0}{k_c\delta_0}$.

Po przekształceniach algebraicznych powyższej zależności oraz dokonaniu rozwinięcia w szereg potęgowy wyrażenia określającego formę szczeliny przywirnikowej otrzymuje się zależność

$$p_r = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}[\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi\right)^2 + 2\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi\right)\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{s}\sin(\omega_k^{s/r}\cdot t-\lambda_{sk}\varphi)\right)+$$
$$\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{s}\sin(\omega_k^{s/r}\cdot t-\lambda_{sk}\varphi)\right)^2]\left[1+2e_d\cos\varphi+2e_s\cos\left(\varphi-\omega^r t\right)\right] \tag{9}$$

przy czym $\omega^{s/r}$ jest częstością przebiegów funkcji przepływu stojana względem wirnika, ω^r częstością obrotową wirnika.

W wyniku dalszych przekształceń otrzymuje się trzy formy naprężeń radialnych oddziałujących na wirnik turbogeneratora:

Pierwszą formą oddziaływania elektromagnetycznego są naprężenia główne postaci

$$p_r = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}[\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi\right)^2 + 2\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi\right)\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{s}\sin(\omega_k^{s/r}\cdot t-\lambda_{sk}\varphi)\right)+$$
$$+\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{s}\sin(\omega_k^{s/r}\cdot t-\lambda_{sk}\varphi)\right)^2]. \tag{10}$$

Siły te odpowiadają wymuszeniom elektromagnetycznym w reprezentacji przepływu i powierzchniowej przewodności magnetycznej szczeliny przy braku ekscentryczności. Są to siły o wysokich rzędach zmienności przestrzennej pola stojana i częstotliwościach stanowiących wielokrotność częstotliwości obrotowej. Siły naciągu od indukcji magnetycznej pola stojana są dominujące i zależą od stanu obciążenia turbogeneratora, a nie zmieniają się w toku eksploatacji. Natomiast siły naciągu związane z ekscentrycznością wirnika mogą się zmieniać podczas eksploatacji bloku energetycznego.

Drugą grupę w wyrażeniu naciągu magnetycznego (8) stanowią naprężenia elektromagnetyczne powstające wskutek ekscentryczności statycznej

$$p_{rS} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}[2e_s\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi\right)^2\cos(\varphi-\omega^r t)+$$
$$+4e_s\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi\right)\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{s}\sin(\omega_k^{s/r}t-\lambda_{sk}\varphi)\right)\cos(\varphi-\omega^r t)+ \tag{11}$$
$$+2e_s\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}\sin(\omega_k^{s/r}\cdot t-\lambda_{sk}\varphi)\right)^2\cos(\varphi-\omega^r t)]$$

Trzecią grupę stanowią naprężenia elektromagnetyczne powstające wskutek ekscentryczności dynamicznej

$$p_{rD} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}[2e_d\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi\right)^2\cos(\varphi)+$$

$$+4e_d\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{r}\cos\lambda_{rk}\cdot\varphi\right)\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{s}\sin(\omega_k^{s/r}t-\lambda_{sk}\varphi)\right)\cos(\varphi)+ \tag{12}$$

$$+2e_d\left(\sum_{k=1}^{\infty}\Theta_{mk}^{s}\sin(\omega_k^{s/r}t-\lambda_{sk}\varphi)\right)^2\cos(\varphi)].$$

Należy zauważyć, że iloczyn funkcji przepływu i funkcji przewodności magnetycznej uzależnionej od ekscentryczności (wyznaczający szczelinową indukcję magnetyczną) implikuje dużą różnorodność harmonicznych w spektrum oddziaływań elektromagnetycznych.

2.2. Ogólna charakterystyka naprężeń elektromagnetycznych ekscentryczności

Biorąc pod uwagę, że dominujące jest podstawowe pole magneśnicy (wirnika), można spektrum harmonicznych w wyrażeniach na naprężenia ograniczyć do pierwszej harmonicznej, a ponadto, uwzględniając znaczenie harmonicznych o najniższym poziomie częstotliwości, można znacznie ograniczyć zbiór obciążeń.

W zbiorze oddziaływań powstających wskutek ekscentryczności statycznej na wyróżnienie zasługują przede wszystkim siły powierzchniowe o częstości obrotowej ω^r, a więc częstotliwości 50 Hz. Wyróżnia się przy tym harmoniczne przestrzenne pierwszego rzędu i harmoniczne związane z liczbą biegunów.

$$p_{rS(o)} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}2e_s\left(\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{2}(\Theta_{mk}^{r})^2\cos(\varphi-\omega^r t)\}\right), \tag{13}$$

$$p_{rS(s)} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}[2e_s\left(\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{2}(\Theta_{mk}^{s})^2\{\cos[(2p+1)\cdot\varphi\quad\omega^r t]+\cos[(2p-1)\varphi+\omega^r)\,t]\right).$$

Drugą grupą w tym zbiorze są oddziaływania zdeterminowane podstawową harmoniczną pola wirnika (magneśnicy) i wyższymi harmonicznymi tego pola

$$p_{rS(s)} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}2e_s\left(\begin{array}{l}\sum_{k=1}^{\infty}(\Theta_{m0}^{r}\Theta_{mk}^{r})\left(-\frac{1}{2}\right)\{\cos[(p+\lambda_{rk}+1)\cdot\varphi-\omega^r t]+\\ +\cos[(p+\lambda_{rk}-1)\,\varphi+\omega^r t]\\ -\cos[(p-\lambda_{rk}+1)\cdot\varphi-\omega^r t]-\cos[(p-\lambda_{rk}-1)\cdot\varphi+\omega^r t]\}\end{array}\right). \tag{14}$$

W powyższej grupie oddziaływań wyróżnia się formy sił powierzchniowych współbieżnych ($+\omega^r$) i przeciwbieżnych ($-\omega^r$).

Siły powierzchniowe ekscentryczności statycznej od zinterferowanych przepływów stojana i wirnika mają postać

$$p_{rS(0,k)} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}4e_s\left(\begin{array}{l}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{4}(\Theta_{m0}^{r}\,\Theta_{mk}^{s}\{\cos[(p+\lambda_{sk}+1)\cdot\varphi-(\omega^{s/r}+\omega^r)t]+\\ \cos[(p+\lambda_{sk}-1)\cdot-(\omega^{s/r}-\omega^r)t]\\ -[\cos[(p-\lambda_{sk}+1)\cdot\varphi-(\omega^{s/r}-\omega^r)t]+\\ -\cos[(p+\lambda_{sk}-1)\cdot\varphi-(\omega^{s/r}+\omega^r)t]]\}\end{array}\right). \tag{15}$$

Powyższe oddziaływania cechują się częstością, która wyznaczona jest sumą (różnicą) częstości przebiegów harmonicznych przestrzennych przepływu stojana względem wirnika ($+\omega^{s/r}$) i częstością obrotową wirnika ($+\omega^{r}$).

Spośród oddziaływań ekscentryczności statycznej od przepływu stojana dominujące są siły postaci

$$p_{rS(k)} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}[2e_s \left(\begin{array}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2}(\Theta_{mk}^{s})^2\{\cos(\varphi-\omega^{r}t)-\frac{1}{2}[\cos[(2\lambda_{sk}+1)\cdot\varphi-(\omega^{s/r}+\omega^{r})t]+ \\ +\cos[(2\lambda_{sk}-1)\cdot\varphi-(\omega^{s/r}-\omega^{r})t]]\} \end{array} \right). \quad (16)$$

W zbiorze oddziaływań ekscentryczności dynamicznej tylko dwie grupy tych oddziaływań mają zmienność przestrzenno-czasową. Są to siły powierzchniowe od przepływu stojana i wirnika oraz przepływu stojana.

W grupie oddziaływań od sprzężonych przepływów stojana i wirnika wyróżnia się składnik postaci

$$p_{rD(0,ks)} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}[4e_d \left(\begin{array}{l} \sum_{k=1}^{\infty} (\Theta_{m0}^{r}\Theta_{mk}^{s})\left(-\frac{1}{4}\right)\{\cos[(p+\lambda_{sk}+1)\cdot\varphi-\omega^{s/r}t]+ \\ +\cos[(p+\lambda_{sk}-1)\cdot\varphi-\omega^{s/r}t] \\ -\cos[(p-\lambda_{sk}+1)\cdot\varphi+\omega^{s/r}t]-\cos[(p-\lambda_{sk}-1)\cdot\varphi+\omega^{s/r}t]\} \end{array} \right) \quad (17)$$

W grupie oddziaływań od przepływów stojana można uznać za dominujące składniki monoharmoniczne o postaci

$$p_{rD(k)} = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0}[2e_s \left(\begin{array}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2}(\Theta_{mk}^{s})^2\{\cos[(2\lambda_{sk}+1)\cdot\varphi-\omega^{s/r}t]+ \\ -\cos[(2\lambda_{sk}-1)\cdot\varphi-\omega^{s/r}t]\} \end{array} \right). \quad (18)$$

Z powyższych zależności wynika, że siły powierzchniowe oddziałujące na wirnik i wywołane jego ekscentrycznością dynamiczną charakteryzują się wysokimi częstotliwościami. Należy w tym miejscu zauważyć, że ekscentryczność wirnika wywołuje siły elektromagnetyczne od głównego pola maszyny o częstotliwości energetycznej (obrotowej) - 50 Hz.

Dokonując krótkiej oceny sił elektromagnetycznych oddziałujących na wirnik turbogeneratora wskutek ekscentryczności (statycznej i dynamicznej) można stwierdzić, że powstają siły o częstotliwości obrotowej $f^{r} = \omega^{r}/2\pi$. Ponadto pole magnetyczne powstające w wyniku sprzężenia pola przepływu stojana z przewodnością właściwą (permeancją właściwą) szczeliny przywirnikowej, spowodowanej ekscentrycznością, jest przyczyną oddziaływań o częstotliwościach określonych wzorem

$$\begin{aligned} f_{el} &= f_{(k)}^{s/r} + f^{r}, \\ f_{el} &= f_{(k)}^{s/r} - f^{r}, \end{aligned} \quad (19)$$

a więc przykładowo pojawiają się siły o częstotliwościach 650 i 550 Hz.

Biorąc pod uwagę oszacowania ekscentryczności (dla turbogeneratorów energetycznych o mocy 200 MW) następującymi wartościami: ekscentryczność statyczna ε_s = 10 mm, ekscentryczność dynamiczna ε_d =5 mm; oraz przyjmując szerokość szczeliny przywirnikowej równą δ =10 cm dla jednostek o mocy 200 MW, można oszacować wartości sił powierzchniowych ekscentryczności na około 10% wskutek ekscentryczności statycznej i 5% wskutek ekscentryczności dynamicznej w stosunku do wartości siły od podstawowej harmonicznej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

Należy zauważyć, że klasyfikacja ekscentryczności oraz jej zmienność przestrzenno-czasowa została dokonana w odniesieniu do stojana turbogeneratora, natomiast z przedstawionych zależności wynika, że w odniesieniu do wirnika ekscentryczności te mają odwrotne znaczenie. Oznacza to, że ekscentryczność statyczna, a więc przesunięcie osi wirnika względem osi stojana,

jest przyczyną sił powierzchniowych oddziałujących na wirnik o szerszym spektrum harmonicznych czasowych aniżeli sił powstających wskutek ekscentryczności dynamicznej.

Trzeba w tym miejscu jeszcze raz podkreślić, że składniki radialnych naprężeń powierzchniowych (naciągu magnetycznego) powstające wskutek ekscentryczności wirnika generują efekty wibracyjne, które przy zmianach ekscentryczności mogą być symptomami w ocenie stanu technicznego bloku energetycznego. Tak więc obraz spektralny sił może być podstawą badań diagnostycznych w ujęciu diagnostyki wibracyjnej. W końcu istotnym wynikiem jest wskazanie sił (powierzchniowych, ale model ten może być również rozszerzony na siły objętościowe) wymuszających drgania wirnika o wyższych częstotliwościach. Istotne jest to dlatego, że wymuszenia te mogą być przyczyną rezonansów parametrycznych. Przyczynę rezonansów parametrycznych upatruje się dotychczas w anizotropii konstrukcyjnej (wewnętrznej) wirników turbogeneratorów.

3. UWAGI O METODYCE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Materiał eksperymentalny badań drgań wirników turbogeneratorów jest stosunkowo skromny w porównaniu z wynikami pomiarów drgań stojanów. Wynika to oczywiście z trudności technicznych, biorąc pod uwagę kinematykę wirników, ustrój podpór łożyskowych, konstrukcję stojana i skrajnych elementów kadłuba. Standardowymi pomiarami wibracji podzespołu wirnikowego objęte są drgania łożysk. Obecnie w ramach badań poznawczych lub eksperckich (w sytuacjach awaryjnych) przeprowadza się pomiary drgań wirników turbogeneratorów metodą bezstykową. Są to jednak badania okazjonalne i zazwyczaj nie publikowane. O ile metodyka pomiarów drgań stojanów jest dobrze opracowana, to pomiary drgań wirników nie mają metodycznego usankcjonowania. Każdy pomiar drgań wirników turbozespołu powinien być scharakteryzowany wieloma parametrami fizycznymi ze względu na oddziaływanie wzajemne wirników turbiny i generatora, istnienie prędkości rezonansowych oraz oddziaływań sił elektromagnetycznych na wirnik generatora.

Podstawowymi parametrami stanu wibracyjnego turbozespołu są: prędkość obrotowa, stan cieplny turbiny i mediów chłodzących generatora, stan energetycznego obciążenia turbogeneratora. Podstawowym stanem pracy turbogeneratora jest praca w sieci elektroenergetycznej z zasady przy prędkości synchronicznej Ω_{synch} i znamionowej częstotliwości sieci. Stan energetycznego obciążenia wyznaczony jest wartością napięcia na zaciskach generatora U oraz mocą czynną P i bierną Q. Wymienione parametry mają odniesienie w innych wielkościach, takich jak prąd stojana I_s i wirnika I_r, współczynnik mocy $\cos\varphi$ i kąt obciążenia ϑ, charakteryzujących stan energetycznego obciążenia generatora, które bezpośrednio wyznaczają stan elektromagnetycznego obciążenia (w znaczeniu sił objętościowych i naprężeń) wirnika. Zatem stan wibracyjny wirnika należy odnosić do następujących wielkości: U, P, I_s, I_r, oraz warunków cieplnych, a więc temperatury medium chłodzącego odpowiednio wirnika i stojana T_w, T_s. Należy w tym miejscu zauważyć, że pomiary wibracji wszystkich podukładów (stojana, wirnika) i elementów (zawieszenie stojana) turbogeneratora powinno się wykonywać w zakresach pracy indukcyjnej Q>0 i pojemnościowej Q<0. Poza standardowymi stanami obciążeń turbogeneratora interesującymi stanami są: stan biegu jałowego i zwarcie. Niektóre pomiary mogą być wykonywane podczas wybiegu bloku energetycznego.

Odnośnie do parametrów efektów wibracyjnych zastosowany system pomiarowy (czujniki pomiarowe i aparatura pomiarowa) powinien zapewnić wyznaczenie drgań w przedziale spektralnym $f \in \langle f_0$ - 10 kHz>. Protokół pomiarów powinien zawierać wartości amplitud przemieszczeń i wartości skuteczne prędkości drgań z analizy tercjowej pomiarów wibracji oraz wartości ekstremalne z analizy wąskopasmowej. Należy w tym miejscu zauważyć, że znaczny walor poznawczy miałyby pomiary wibracji w stanach dynamicznych, np. gwałtownego zmniejszenia lub zwiększenia obciążenia turbozespołu.

Na zakończenie powyższych uwag należy stwierdzić, że problem metodyczny pomiarów drgań wirników turbogeneratorów pozostaje otwarty, jednak należałoby zmierzać do ustalenia wstępnych zasad normatywnych. Wyniki pomiarów drgań wirników turbozespołów nie odniesione do stanu energetycznego obciążenia turbogeneratora mają tylko znaczenie informacyjne i nie stanowią materiału do weryfikacji modeli obliczeniowych dynamiki wirników.

4. UWAGI KOŃCOWE

Jak zaznaczono uprzednio, celem niniejszych rozważań było sformułowanie modelu pierwszego przybliżenia sił oddziałujących na wirnik turbogeneratora i wyjaśnienie uwarunkowań częstotliwości tych sił. Wyznaczono zbiory form przestrzenno-czasowych sił od pola przepływu stojana sprzęgającego się z polem wirnika (nieruchomym względem wirnika) oraz uwarunkowanych jego ekscentrycznością. Jest to znaczne rozszerzenie interpretacji zewnętrznych sił wymuszających drgania wirników turbogeneratorów prezentowanych w innych publikacjach [2, 7], w których jako przyczynę, bez przytoczenia jakichkolwiek zależności formalnych, wskazuje się „niejednorodne pole elektromagnetyczne w generatorze, powstające wskutek wirowania niewspółosiowo osadzonego wirnika względem statora" [2].

Na podstawie zaprezentowanego modelu ujawniono bardzo szerokie spektrum częstotliwości sił (lecz nie pełne w stosunku do obrazu rzeczywistego), co skłania do dalszych badań. Następnym uogólnieniem przedstawionego modelu obliczeniowego sił elektromagnetycznych oddziałujących na wirnik powinno być rozszerzenie o oddziaływania elektrodynamiczne, a więc uwzględnienie sił powstających wskutek oddziaływania pola magnetycznego z prądami wirnika.

W skróconej formie zasygnalizowano zagadnienia związane z metodyką badań eksperymentalnych, co ma podstawowe znaczenie w weryfikacji formułowanych modeli obliczeniowych. Podniesienie tej kwestii wyniknęło z przedstawiania (w pewnych raportach z badań wibracyjnych maszyn energetycznych) wyników pomiarów drgań wirników turbozespołów ograniczonych tylko do wartości prędkości drgań, lecz bez odniesienia do stanu energetycznego obciążenia turbozespołu. Bez określenia warunków pomiarów wyniki takie mają tylko znaczenie poglądowe.

LITERATURA

1. Detinko F.M., Zagorodnaja G.A., Fastobskij W. M.: Procznost i kolebanie elektriczeskich maszin. Energia, Leningrad 1969.
2. Gryboś R.: Dynamika maszyn wirnikowych. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1994.
3. Szubow I.G.: Szum i wibracia elektriczeskich maszin. Energoatomizdat. Energia, Leningrad 1986.
4. Titow W. W., Hutoreckij G. M., G. A. Z. Zagorodnaja i dr.: Turbogeneratory. Energia 1965.
5. Tondl A.: Dinamika wirnikow turbogeneratorow. Energia, Leningrad 1971.
6. Vance J. M.: Rotor dynammics of turbomachinery. W&S New York 1988.
7. Walczyk Z.: Dynamika wirnikowych maszyn energetycznych. ZNPG Mechanika LXIV, Gdańsk 1992.
8. Proceedings of the 7 th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. ISROMAC - 7 Honolulu 1998.
9. Chu W.K.: High Vibration of a 125MW Steam Turbine During Run-up and Coast Down. ibid.
10. Gajin S., Kuzmanovic S. B., Maricic I.: Identification of Stiffness Reduction in the System of Steam Turbine Generator Sets by Application of Modal Test Under Conditions in Situ. ibid.
11. Young-hwan Lee, Sang Hyun Choi, Jang Pyo Hong, Dong Chul Han: Vibration Analysis of a Wirnik System using a Modified Transfer Matrix method. ibid.

Recenzent: Dr hab. inż. Witold Rams
Profesor Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 marca 2001 r.

Abstract

Coupling turbine rotors and generator is a very complicated dynamical system because of their kinematics, constructions, constitutive structure and complexity of tensions of different physical nature (heat, mechanical, electromagnetic).

The turbine rotor is vital for power transmission of this system as a turbogenerator drive and is influenced by heat and mechanical fields from the system, itself as well as by the turbogenerator rotor.

Electrodynamic interaction of the stator magnetic field can be classified as peculiar forces influencing the turbogenerator rotor and indirectly the turbo-set.

A phenomenon of generation of high frequency forces (much higher than frequencies of electro-energetic system) is explained. That phenomenon is the reason of the rotor vibrations, which are observed in experimental investigations.

It is assumed that electromagnetic forces in some situations can be the reason of loss of the turbo-system rotor mechanical stability, which can result in dangerous failures.

Forms of electromagnetic radial surface forces caused, by the stator magnetic field influencing the turbogenerator rotor (8) are presented in this paper. Those forces are created by the rotor eccentricity (10), (11).

In this paper there is explained generation of high frequency forces (much higher than the frequencies of electro-energetic system) from which prevailing forces are those of frequencies 550, 600 and 650 Hz.