

Analiza momentów skrętnych na wale turbosespołu 1308 MVA

Streszczenie. Przedstawiono analizę momentów skrętnych na wale turbosespołu 1308 MVA występujących podczas rozmaitych zakłóceń sieciowych, obliczonych za pomocą uniwersalnego modelu matematycznego.

Abstract. Using a universal mathematical model of a turbine-generator units is calculated torsional shaft moment under different operating conditions. (Analyse torsional shaft moment of turbine-generator 1308 MVA).

Słowa kluczowe. Turbosespół, momenty skrętne, drgania, wytrzymałość zmęczeniowa materiału.

Keywords. Turbine-generator, torsional shaft moment, vibrations, fatigue strength

Wstęp

Na problemy związane z drganiami skrętnymi wałów zwrócono uwagę analizując awarie dużych turbosespołów w latach siedemdziesiątych w Europie [1] i Stanach Zjednoczonych [2]. Opracowano środki zaradcze jak np. okresowe zastrzone przeglądy stanu wirników turbosespołów oraz specjalne wymagania dotyczące synchronizacji, SPZ itp. [3].

Podczas pracy turbosespołów w systemie elektroenergetycznym ciągle występują nienormalne stany pracy, w wyniku których powstają skrętne kołysania wałów turbosespołów prowadzące do kumulacji zjawisk zmęczeniowych w materiale wirników. Wyniki badań obliczeniowych wykonywanych przez wielu autorów wykazują, że przy skrętnych kołysaniach mogą powstać znaczne przemienne momenty skrętne (zwarcia zewnętrzne, SPZ, błędna synchronizacja, rezonans podsynchroniczny), które powodują zmęczenie niskoczęstotliwościowe, jak również mniejsze przemienne momenty skrętne (zrzuty mocy, praca asynchroniczna) powodujące zmęczenie wysokiej częstotliwości. Systemy diagnostyki turbosespołów dużej mocy, zawierające diagnostykę czasu życia wałów, powinny uwzględnić wszystkie rodzaje nienormalnych stanów pracy.

Przy analizie wpływu skrętnych kołysań na wał turbosespołu wyjściowym etapem jest wyznaczenie elektromagnetycznego momentu obrotowego [4].

Moment elektromagnetyczny turbogenerators, zmiana którego jest pierwotną przyczyną drgań skrętnych w jednostkach względnych określa się wyrażeniem:

(1)

$$M_{em} = \frac{\delta W_m}{\delta \alpha}$$

gdzie: W_m - koenergia pola magnetycznego turbogenerators, α - kąt między osią uzwojenia wzbudzenia a osią fazy Ll stojana, charakteryzujący położenie dwubiegunowego wirnika turbogenerators w dowolnym momencie czasu.

Zgodnie z obliczeniami największy wpływ turbogenerators na zmniejszenie momentu skrętnego ma uwzględnienie jego tłumiącego działania w stanach rezonansowych i błędnym SPZ, odpowiednio o 49 % i 31 % a przy zwarcia tylko o 5 % [5].

Obliczenia wykazały, że absolutne wartości uszkodzalności włączając stany rezonansowe są niewielkie. Nie znaczy to jednak, że diagnostyka wytrzymałości zmęczeniowej materiału wałów przy skrętnych kołysaniach nie jest ważna. Większość rozpatrywanych procesów przejściowych powtarza się wielokrotnie, a to przy długotrwałej eksploatacji ma istotny wpływ na zmęczeniową wytrzymałość materiału wałów.

Praktyczne zastosowanie matematycznego modelu

charakteryzuje się możliwościami wyliczenia w różnych stanach chwilowych wartości prądów i napięć fazowych, momentu elektromagnetycznego, które są wyjściowymi informacjami dla zbudowania i funkcjonowania systemu diagnostycznego turbosespołu.

W kraju na problem ten zwrócono uwagę na przełomie wieków [6,7]. Przedstawiono wówczas przyczyny i objawy występowania drgań skrętnych wałów oraz podjęto ich badania symulacyjne. Omówiono występujące za granicą przypadki awarii turbosespołów związane z drganiami skrętnymi wału i ich diagnostyką. Wykonano obliczenia symulacyjne drgań skrętnych wałów turbosespołów 200 MW [8,9] i 360 MW [10] stosując uniwersalny model matematyczny EMTP (Electromagnetics Transients Program – Program Obliczeń Przejściowych Zjawisk Elektromagnetycznych) [11].

Model turbosespołu w programie EMTP

Możliwe jest symulowanie dynamiki turbosespołu z dowolną liczbą oddzielnych mas wirujących osadzonych na wspólnym wale. Przyjęto, że każda masa jest sztywna i połączona sprężysto z sąsiadującymi masami.

Każda masa, z wyjątkiem turbogenerators ma przypisaną moc napędzającą, która może być stała lub zmieniać się w wyniku działania układów regulacyjnych.

W obliczeniach założono, że moment elektromagnetyczny działa na wirnik turbogenerators jako na masę skupioną. Nie wykonywano więc obliczenia rozkładu momentu wzdłuż długości wirnika. Można przyjąć równomierny rozkład momentu wzdłuż długości wirnika.

Elektryczna część modelu turbosespołu

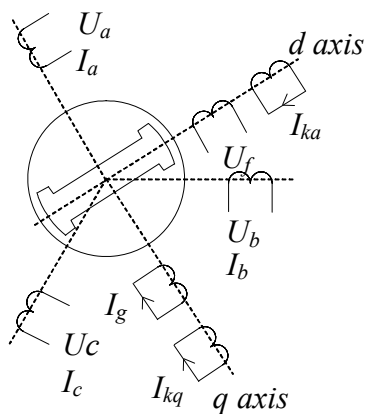
Przedstawiony na rysunku 1 trójfazowy model turbogenerators stosowany w programie EMTP zawiera następujące uzwojenia:

- trzy uzwojenia fazowe stojana przyłączone do sieci (prądy I_a, I_b, I_c),
- uzwojenie wzbudzenia dające strumień w osi d (prąd I_f),
- zastępcze uzwojenie tłumiące w osi d (prąd I_{kd}),
- zastępcze uzwojenie reprezentujące efekt działania prądów wirowych (prąd I_g),
- zastępcze uzwojenie tłumiące w osi q (prąd I_{kq}).

Program umożliwia obliczenie stanów przejściowych przy uwzględnieniu nieliniowej charakterystyki magnesowania układu wzbudzenia.

Jako dane wejściowe do modelowania turbogenerators mogą posłużyć rezystancje i indukcyjności uzwojeń uzyskane od producenta, zestawione w tabeli 1.

Jeśli istnieje potrzeba (dla dłuższych czasów symulacji) można zamodelować układy regulacyjne wzbudzenia i mocy mechanicznej. W takim przypadku potrzebna jest struktura blokowa układów regulacji (transmitancje i jej parametry).



Rys.1. Zastępczy schemat elektryczny turbogeneratora

Tabela 1. Dane wejściowe do modelowania turbogeneratora

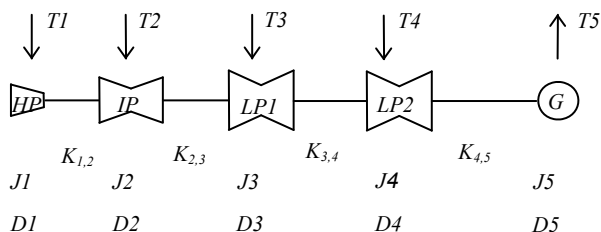
Oznaczenie	Nazwa	Jednostka
S	Moc znamionowa	MVA
U_n	Napięcie znamionowe	kV
NP	Liczba biegunów (nie par biegunów)	-
I_{wzb}	Prąd wzbudzenia przy napięciu znamionowym nieobciążonego generatora	A
R_a	Rezystancja twornika	j.w.
X_l	Reaktancja rozproszenia twornika	j.w.
X_d, X_d', X_d''	Reaktancja synchroniczna, przejściowa i nadprzejściowa w osi d	j.w.
X_q, X_q', X_q''	Reaktancja synchroniczna, przejściowa i nadprzejściowa w osi q	j.w.
$T_{do'}, T_{do}'', T_{qo'}, T_{qo}''$	Stałe czasowe dla otwartych obwodów d i q	S
X_0	Reaktancja kolejności zerowej	j.w.
R_n, X_n	Impedancja uziemienia punktu gwiazdowego generatora	j.w.

Mechaniczna część modelu turboszespołu

Na rysunku 2 przedstawiono układ mas wirujących osadzonych na wspólnym wale.

Do odwzorowania turboszespołów niezbędny jest model wielomasowy np. podczas badania rezonansów podsynchronicznych. Modeluje się wówczas od 6 do 20 mas wirujących.

W tabeli 2 podano zestawienie danych potrzebnych do zamodelowania wirującego wielomasowego układu turboszespołu.



Rys.2. Struktura turboszespołu w badanym bloku 1308 MVA.

(J – momenty bezwładności mas wirujących, D – stałe tłumienia, K – stała sprężystości, T – momenty siły (mechaniczne i elektromechaniczne))

Tabela 2. Zestawienie danych potrzebnych do zamodelowania wirującego wielomasowego układu turboszespołu.

Oznaczenie	Nazwa	Jednostka
T_i	Udział momentu (lub mocy) napędzającego w całkowitym momencie (lub mocy) napędzającym, nie dotyczy turbogeneratora	jw
J_i	Moment bezwładności	$\text{kg m}^2 \cdot 10^6$
$D_{i,i+1}$	Współczynnik tłumienia wg wzoru (2) nie dotyczy ostatniej masy wirującej	N m s rad^{-1}
D_i	Współczynnik tłumienia wg wzoru (3)	N m s rad^{-1}
$D_{i,abs}$	Współczynnik tłumienia wg wzoru (4)	N m s rad^{-1}
$K_{i,i+1}$	Stała sprężystości połączenia $i, i+1$ wg wzoru (5) nie dotyczy ostatniej masy wirującej	$\text{N m s rad}^{-1} 10^6$

Oznaczenia w tabeli 2:

(2)

$$T_i = D_{i,i+1} \cdot (\omega_i - \omega_{i+1})$$

(3)

$$T_i = D_i \cdot (\omega_i - \omega_s)$$

(4)

$$T_i = D_{i,abs} \cdot \omega_i$$

(5)

$$T_{spr,i} = -T_{spr,i+1} = K_{i,i+1} \cdot (\delta_i - \delta_{i+1})$$

T_i - moment tłumiący działający na masę i , ω_i - prędkość obrotowa masy i , ω_s - prędkość synchroniczna, $T_{spr,i}$ - moment skręcający wału, δ_i - położenie kątowe masy i

Wielkości wyjściowe (wyniki) z obliczeń symulacyjnych podano w tabeli 3.

Tabela 3. Wielkości wyjściowe (wyniki) z obliczeń symulacyjnych.

Wielkości elektryczne	
I_a, I_b, I_c	Prądy fazowe stojana generatora
I_d	Prąd w osi d uzwojenia stojana
I_q	Prąd w osi q uzwojenia stojana
I_{wzb}	Prąd wzbudzenia
$I_{d, st}$	Prąd w zastępczym uzwojeniu tłumiącym w osi d uzwojenia stojana
I_{wir}	Prąd w zastępczym uzwojeniu odwzorowującym efekt strat wiroprowadowych
$I_{q, st}$	Prąd w zastępczym uzwojeniu tłumiącym w osi q uzwojenia stojana
U_d	Napięcie na uzwojeniu d stojana
U_q	Napięcie na uzwojeniu q stojana
U_{wzb}	Napięcie wzbudzenia
Wielkości elektromechaniczne i mechaniczne	
M_F	Siła magnetomotoryczna w szczelinie, [A]
M_A	Kąt między składowymi w osi q i d siły magnetomotorycznej w szczelinie [rad]
T_{gen}	Moment elektromagnetyczny turbogeneratora
T_{wzb}	Moment elektromagnetyczny wzbudnicy
ψ_d	Strumień magnetyczny w osi d
ψ_q	Strumień magnetyczny w osi q
δ_i	Kąt określający położenie masy i
ω_i	Prędkość kątowa masy i
T_i	Moment mechaniczny skrętny w wale między masą i oraz $i+1$

Dane elektryczne i mechaniczne modelowanego turboszespołu

Parametry techniczne badanego turbogeneratora o mocy pozornej 1308 MVA podano w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry techniczne badanego turbogeneratora o mocy pozornej 1308 MVA

Parametr	Oznaczenie	Wymiar	Wartość
Moc pozorna	S_n	MVA	1308
Moc czynna	P_n	MW	1111,8
Współczynnik mocy	$\cos \phi$	-	0,85
Napięcie znamionowe stojana	U_n	kV	27
Prąd stojana	I_n	kA	27,97
Napięcie wirnika	U_w	V	640
Napięcie wirnika przy biegu jałowym	U_{w0}	V	163
Prąd wirnika	I_w	A	698,4
Prąd wirnika przy biegu jałowym	I_{w0}	A	206,0
Częstotliwość	f_n	Hz	50
Prędkość obrotowa	n	obr./min.	3000
Sprawność generatora	η	%	98,94
Asymetria obciążenia dopuszczalna krótkotrwałe	$(I_2/I_{nG})^2 t$	-	5,0
Stosunek zwarcia	k_z	-	0,5
Rezystancja twornika	R_a	j. w.	0,002
Rezystancja wirnika	R_w	Ω	0,079
Reaktancja kolejności zerowej	X_0	j. w.	0,12
Reaktancja rozproszenia twornika	X_l	j. w.	0,17
Reaktancja synchroniczna w osi d	X_d	j. w.	2,2
Reaktancja przejściowa w osi d	X_d'	j. w.	0,27
Reaktancja podprzejściowa w osi d	X_d''	j. w.	0,22
Reaktancja synchroniczna w osi q	X_q	j. w.	2,2
Reaktancja przejściowa w osi q	X_q'	j. w.	0,44
Reaktancja podprzejściowa w osi q	X_q''	j. w.	0,22
Stała czasowa przejściowa dla otwartego obwodu d	T_{d0}'	s	10,1
Stała czasowa podprzejściowa dla otwartego obwodu d	T_{d0}''	s	0,05
Stała czasowa przejściowa dla otwartego obwodu q	T_{q0}'	s	1,0
Stała czasowa podprzejściowa dla otwartego obwodu q	T_{q0}''	s	0,08
Mechaniczna stała czasowa turbogeneratora	H_G	s	0,726
Mechaniczna stała czasowa turbiny	H_T	s	5,635

Dane wejściowe do modelowania układu mechanicznego turbozespołu podano w tabeli 5.

Przyjęto na podstawie literatury przytoczonej szczegółowo w [12] współczynniki tłumienia mas wirujących oraz stałych sprężystości wału.

Tabela 5. Dane wejściowe do modelowania układu mechanicznego turbozespołu 1308 MVA

Oznaczenie	Jednostka	Nazwa	Wartość
T_1	j.w.	Udział momentu (lub mocy) napędzającego w całkowitym momencie (lub mocy) napędzającym turbiny	0,3
T_2			0,22
T_3			0,24
T_4			0,24
J_1	$\text{kg m}^2 \cdot 10^6$	Moment bezwładności	0,0084
J_2			0,0135
J_3			0,06375
J_4			0,06375
J_5			0,01924

$D_{1 \text{ abs}}$	N m s rad^{-1}	Współczynnik tłumienia wg wzoru (6)	500
$D_{2 \text{ abs}}$			500
$D_{3 \text{ abs}}$			500
$D_{4 \text{ abs}}$			500
$D_{5 \text{ abs}}$			500
$K_{1,2}$	$\text{N m s rad}^{-1} 10^6$	Stała sprężystości wału $i, i+1$ wg wzoru (7) nie dotyczy ostatniej masy wirującej	80
$K_{2,3}$			160
$K_{3,4}$			260
$K_{4,5}$			380

Oznaczenia w tabeli 5:

(6)

$$T_i = D_{i \text{ abs}} \cdot \omega_i$$

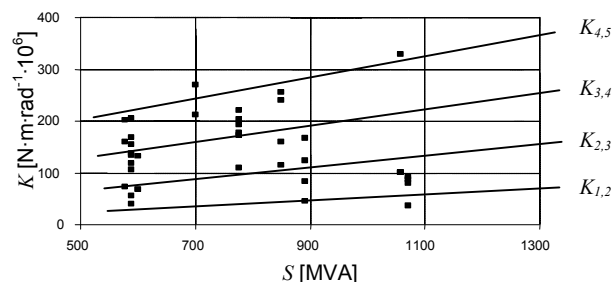
(7)

$$T_{spr,i} = -T_{spr,i+1} = K_{i,i+1} \cdot (\delta_i - \delta_{i+1})$$

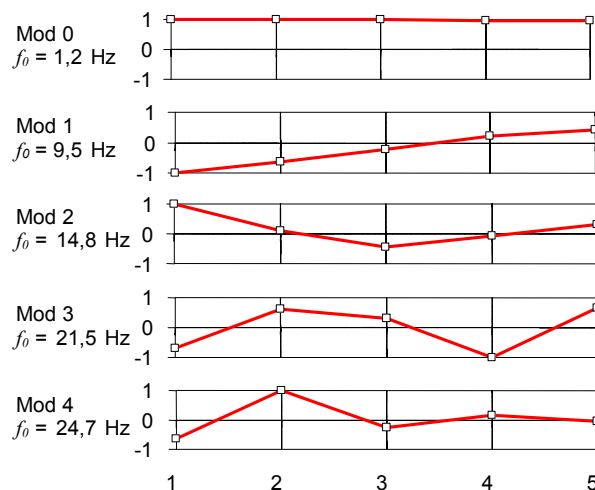
T_i - moment tłumiący działający na masę i , ω_i - prędkość obrotowa masy i , $T_{spr,i}$ - moment skrętny wału, δ_i - położenie kątowe masy i .

Numeracja mas liczona od strony turbiny WP w kierunku turbogeneratora.

Na rysunku 3 przedstawiono na podstawie danych z literatury zależności współczynników sztywności odcinków wałów turbozespołów w funkcji ich mocy [12].



Rys.3. Zależność współczynników sztywności odcinków wałów turbozespołów w funkcji ich mocy



Rys.4. Kształt poszczególnych modów (wartości składowych wektorów własnych macierzy transformacji Q).

Podstawowe parametry transformatora blokowego są następujące:

- Moc pozorna: 1350 MVA (3 jednostki 1-fazowe),
- Przekładnia napięciowa: 27/425 kV/kV,
- Procentowe napięcie zwarcia: $\Delta U_{z\%} = 15,5 \%$,
- Straty obciążeniowe: $\Delta P_{Cu} = 2580 \text{ kW}$

- Straty jałowe: $\Delta P_{Fe} = 420$ kW
 - Pojemności między uzwojeniami GN-DN: $C_T = 2,6$ nF/f
 - Pojemność doziemna uzwojenia GN: $C_{T1} = 2,9$ nF/f
 - Pojemność doziemna uzwojenia DN: $C_{T2} = 12,63$ nF/f
- Moc zwarciova na szynach 400 kV wynosi: $S_{k_{max}} = 22,9$ GVA ($R/X = 0,059$), $S_{k_{min}} = 1,7$ GVA ($R/X = 0,100$).

Linia blokowa 400 kV ma następujące parametry:

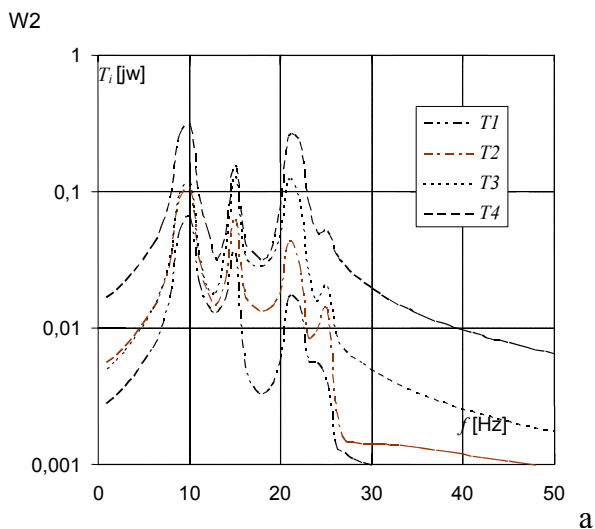
- Napięcie znamionowe: 400 kV
- Długość: $l = 0,725$ km
- Typ przewodu: 408-AL1F/34-UHST
- Reaktancja jednostkowa: $X = 0,285$ Ω /km
- Reaktancja dla składowej zerowej (jednostkowa): $X_0 = 1,36$ Ω /km
- Rezystancja jednostkowa: $R = 0,0292$ Ω /km
- Rezystancja dla składowej zerowej (jednostkowa): $R_0 = 0,177$ Ω /km

Analiza modalna

Celem analizy modalnej jest obliczenie częstotliwości drgań własnych elementów turbozespołu i zbadanie wrażliwości układu na wymuszenia zewnętrzne o częstotliwościach rezonansowych.

Na rysunku 4 przedstawiono kształt poszczególnych modów (znormalizowane wartości składowych wektorów własnych macierzy transformacji Q) [12]. Kształt modów obrazuje wzajemne przemieszczenie poszczególnych mas wirujących w przypadku wystąpienia rezonansu przy danej częstotliwości modalnej.

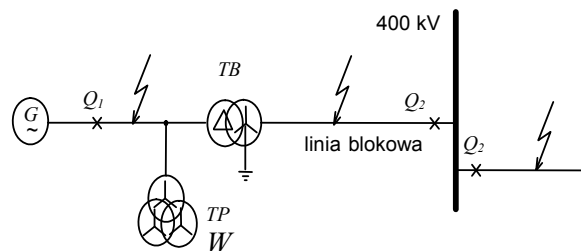
Na rysunku 5 przedstawiono zależność maksymalnych momentów skrętnych T_i (odniesionych do momentów znamionowych wałów) w poszczególnych odcinkach wałów w funkcji częstotliwości sinusoidalnego wymuszenia zewnętrznego od strony sieci, o amplitudzie 1% momentu znamionowego $T_{n_{gen}}$ działającego na wirnik turbogeneratora.



Rys.5. Zależność maksymalnych momentów skrętnych w poszczególnych odcinkach wałów w funkcji częstotliwości sinusoidalnego wymuszenia zewnętrznego o amplitudzie 1% $T_{n_{gen}}$ przyłożonego do wirnika generatora.

Należy zauważyć, że nawet przy tak małym pobudzeniu wirnika momentem zakłócającym, przy pewnych częstotliwościach rezonansowych momenty skrętne przekraczają wartości znamionowe dla tych wałów.

Obliczenia momentów skrętnych na wale turbozespołu podczas zakłóceń



Rys.6. Układ do obliczenia momentów skrętnych na wale turbozespołu podczas wybranych zakłóceń

Wykonano obliczenia momentów mechanicznych skrętnych wału podczas wybranych zakłóceń takich jak zwarcie 3-fazowe i 2-fazowe w pobliżu zacisków generatora, zwarcie 3-fazowe, 2-fazowe i 1-fazowe za transformatorem blokowym, podczas zadziałania zaworu odcinającego oraz podczas synchronizacji przy niezgodności faz. Badany układ pokazano na rysunku 6.

Zwarcia w sieci elektroenergetycznej i zrzut obciążenia

Wyniki obliczeń momentów skrętnych wałów podczas zwarcia i zrzutu obciążenia przedstawia tabela 6. Tabela zawiera maksymalne wartości momentów wyrażone w jednostkach względnych tj. odniesione do momentu znamionowego danego odcinka wału T_{n_i} określonego następująco:

$$(8) \quad T_{n_i} = \frac{P_{n_i}}{\omega_n}$$

gdzie: P_{n_i} - oznacza moc przenoszona danym odcinkiem wału w warunkach obciążenia znamionowego a wynikającą z udziału momentu (lub mocy) w całkowitym momencie (lub mocy) napędzającym części turbiny i podanym w tabeli 5.

Kolejne punkty tabeli 6 dotyczą następujących stanów:
 Z1÷Z2 - 3-fazowe i 2-fazowe zwarcie w pobliżu zacisków generatora. W chwili $t=0,1$ następuje zwarcie, w chwili $t=0,2$ s następuje otwarcie wyłącznika generatorowego i zadziałanie zaworu odcinającego dopływ pary.
 Z3÷Z5 - 3-fazowe, 2-fazowe i 1-fazowe zwarcie na napięciu 400 kV w pobliżu transformatora blokowego na początku linii blokowej. W chwili $t=0,1$ s następuje zwarcie, w chwili $t=0,2$ s następuje otwarcie wyłącznika generatorowego i zadziałanie zaworu odcinającego dopływ pary.
 Z6÷Z7 - 3-fazowe i 1-fazowe zwarcie na napięciu 400 kV w głębi sieci (20 km od generatora). W chwili $t=0,1$ s następuje zwarcie, w chwili $t=0,2$ s następuje otwarcie wyłącznika w linii 400 kV i odcięcie zwarcia.
 Z8 - Praca ustalona generatora i w chwili $t=0,1$ s następuje otwarcie wyłącznika sieciowego i zadziałanie zaworu odcinającego dopływ pary (zrzut mocy).

Obliczenia wykonano dla wstępnych obciążeń generatora: 100%, 80%, 40% i 0%.

Wyniki obliczeń w formie graficznej przedstawiono na rysunkach opisanych w tabeli 6.

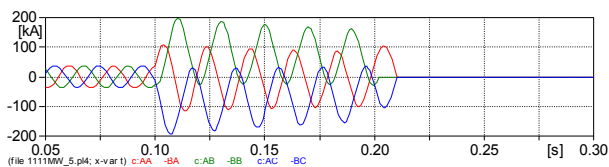
Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi prądów fazowych turbogeneratora podczas zwarcia 3-fazowego w linii blokowej 400 kV za transformatorem blokowym – zakłócenie Z3.

Tabela 6. Maksymalne wartości momentów skrętnych odcinków wału podczas zakłóceń w pracy turbogeneratora

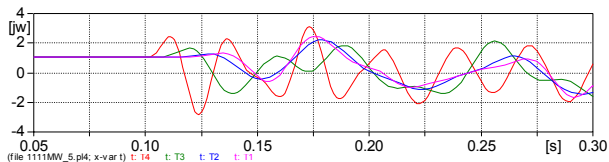
Lp	Opis zakłócenia	Wielkość	Obciążenie generatora			
			100%	80%	40%	0%
			Wartość maks. [j.w.]	Wartość maks. [j.w.]	Wartość maks. [j.w.]	Wartość maks. [j.w.]
Z1	Zwarcie 3-fazowe na szynach 27 kV za wyłącznikiem Q1	T4	4,94	4,62	4,82	4,86
		T3	3,31	2,72	3,26	2,77
		T2	2,89	1,7	2,41	2,1
		T1	3,13	1,77	2,5	2,46
Z2	Zwarcie 2-fazowe na szynach 27 kV za wyłącznikiem Q1	T4	3,51	2,9	2,78	2,25
		T3	1,9	1,71	1,40	1,12
		T2	1,91	1,23	1,21	0,96
		T1	2,06	1,27	1,27	0,97
Z3	Zwarcie 3-fazowe w linii blokowej 400 kV za transformatorem blokowym	T4	3,1	3,02	2,89	2,74
		T3	2,13	2,07	1,62	1,57
		T2	2,22	1,98	1,5	0,79
		T1	2,45	2,18	1,61	0,84
Z4	Zwarcie 2-fazowe w linii blokowej 400 kV za transformatorem blokowym	T4	1,9	1,79	1,56	1,34
		T3	1,43	1,29	1,07	0,78
		T2	1,73	1,5	1,01	0,69
		T1	1,87	1,62	1,09	0,71
Z5	Zwarcie 1-fazowe w linii blokowej 400 kV za transformatorem blokowym	T4	1,78	1,63	1,28	0,92
		T3	1,76	1,58	1,18	0,47
		T2	1,43	1,22	0,77	0,41
		T1	1,51	1,3	0,82	0,41
Z6	Zwarcie 3-fazowe w głębi sieci (20 km od elektrowni) za wyłącznikiem Q3	T4	2,6	2,57	2,49	2,4
		T3	2,51	2,5	2,46	3,25
		T2	2,19	2,19	2,19	2,15
		T1	2,2	2,19	2,18	2,14
Z7	Zwarcie 1-fazowe w głębi sieci (20 km od elektrowni) za wyłącznikiem Q3	T4	1,48	1,36	1,08	0,79
		T3	1,48	1,37	1,09	1,13
		T2	1,46	1,34	1,07	0,79
		T1	1,49	1,37	1,1	0,83
Z8	Praca ustalona - zrzut obciążenia	T4	1,08	0,89	0,48	0,15
		T3	1,45	1,21	0,67	0,26
		T2	1,05	0,87	0,47	0,28
		T1	1,07	0,89	0,53	0,29

Oznaczenia w tabeli: $I_{A,B,C}$ - prądy fazowe generatora, T_{1-4} - momenty skrętne na i -tym odcinku wału (licząc od strony turbiny W/P).

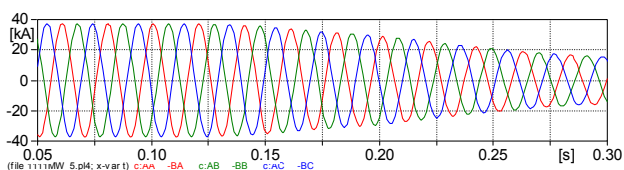
Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi momentów skrętnych na odcinkach wałów turbozespołu podczas zwarcia 3-fazowego w linii blokowej 400 kV za transformatorem blokowym – zakłócenie Z3.



Rys.7. Przebiegi prądów fazowych generatora podczas zwarcia 3-fazowego w linii blokowej 400 kV za transformatorem blokowym - zakłócenie Z3

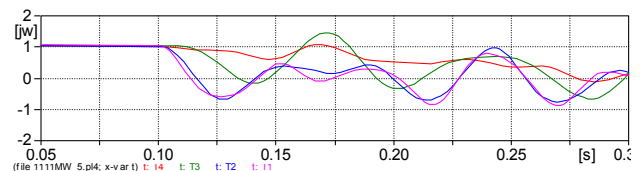


Rys.8. Przebiegi momentów skrętnych na turbozespołu podczas zwarcia 3-fazowego w linii blokowej 400 kV za transformatorem blokowym - zakłócenie Z3

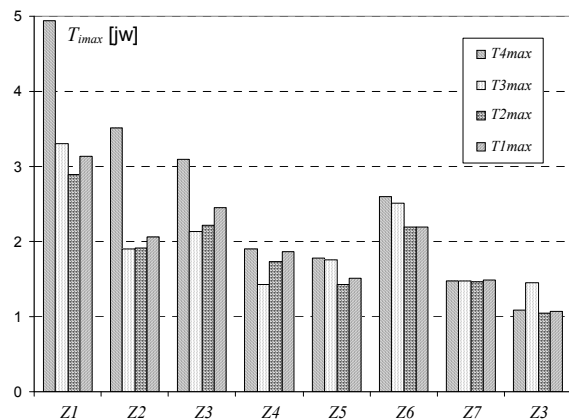


Rys.9. Przebiegi prądów fazowych turbogeneratora podczas zrzutu obciążenia (zamknięcie zaworu odcinającego) - zakłócenie Z8

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi prądów fazowych turbogeneratora podczas zrzutu obciążenia (zamknięcie zaworu odcinającego) zakłócenie Z8.



Rys.10. Przebiegi momentów skrętnych na odcinkach wałów turbozespołu podczas zrzutu obciążenia (zamknięcie zaworu odcinającego) - zakłócenie Z8



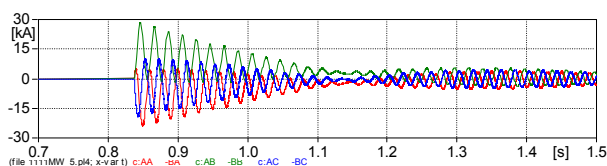
Rys.11. Wartości maksymalnych momentów skrętnych w odcinkach wału turbozespołu podczas zakłóceń opisanych w tabeli 6

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi momentów skrętnych na odcinkach wałów turboszespołu podczas zrzutu obciążenia turbogenerators (zamknięcie zaworu odcinającego) – zakłócenie Z8.

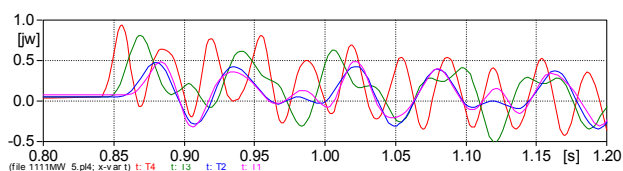
Na rysunku 11 przedstawiono wartości maksymalnych momentów skrętnych w odcinkach wału turboszespołu podczas zakłóceń opisanych w tabeli 6.

Synchronizacja turbogenerators

Wykonano obliczenia przebiegu momentów skrętnych w odcinkach wałów turboszespołu podczas wykonywania synchronizacji wyłącznikiem generatorowym. Obliczenia wykonywano dla różnicy częstotliwości turbogenerators i sieci $\Delta f = 0,1$ Hz oraz dla różnicy kątów fazowych napięć $\Delta\varphi$ w przedziale $0^\circ \div 180^\circ$. Na rysunku 12 pokazano przebiegi prądów turbogenerators a na rysunku 13 przebiegi momentów skrętnych w odcinkach wałów podczas synchronizacji przy niezgodności faz $\Delta\varphi = 10^\circ$.

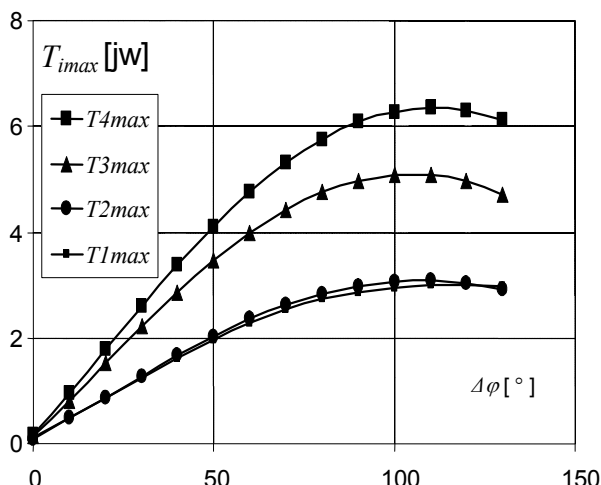


Rys. 12. Przebiegi prądów fazowych turbogenerators podczas synchronizacji przy niezgodności faz $\Delta\varphi = 10^\circ$



Rys. 13. Przebiegi momentów skrętnych podczas synchronizacji przy niezgodności faz $\Delta\varphi = 10^\circ$

Zależność wielkości maksymalnych momentów skrętnych podczas synchronizacji od różnicy kątów fazowych $\Delta\varphi$ pokazano na rysunku 14.



Rys. 14. Zależność wielkości maksymalnych momentów skrętnych w odcinkach wałów 1 ÷ 5 układu wirującego podczas synchronizacji, od różnicy kątów fazowych $\Delta\varphi$

Wnioski

Wykonano obliczenia przebiegów skrętnych momentów mechanicznych na wale turboszespołu 1308 MVA podczas wybranych zakłóceń takich jak zwarcie 3-fazowe i 2-fazowe w pobliżu zacisków generatora, zwarcie 3-fazowe, 2-fazowe i 1-fazowe za transformatorem blokowym dla różnych obciążeń turbogenerators, podczas zrzutu obciążenia (działanie zaworu odcinającego) oraz podczas synchronizacji przy niezgodności faz.

Wartości momentu skrętnego na wale turboszespołu przy zwarcu na zaciskach osiągają 4,94 j.w. dla zwarcia 3-fazowego i 3,51 j.w. dla zwarcia 2-fazowego.

Wartości momentu skrętnego na wale turbogenerators przy zwarcu w linii blokowej osiągają wartość 3,1 j.w. dla zwarcia 3-fazowego.

Wartości momentu skrętnego na wale turbogenerators przy zwarcu w sieci 400 kV dla zwarcia 3-fazowego, w odległości 20 km od stacji 400 kV osiągają wartość 2,6 j.w.

Wartości momentu skrętnego na wale turboturbogenerators przy zwarcach zależą od wstępnego obciążenia turboturbogenerators i są mniejsze dla mniej obciążonego.

Wartość momentu skrętnego na wale turboturbogenerators przy synchronizacji zależy od kąta przesunięcia fazowego i dla kąta 110° wynosi 5,25 j.w.

LITERATURA

- [1] Bölderl i inni: Die Torsionsmomente i Turbinen – und Generatorwellen bei Kurzchlüssen, Fehlsynchronisierung und Kurzschluss – abschaltung. *ETZ-A* Bd. 96 1975, s. 164-171.
- [2] Joyce J.S. i inni: Torsional fatigue of turbine-generator shafts caused by different electrical system faults and switching operations. *IEEE Transactions on PAS* Vol PAS-97, No 5 Sept./Oct. 1978 p. 1965-1976.
- [3] Rusche P.A.E.: Network alternatives to reduce turbine-generator shaft – stresses. *IEEE Transactions on PAS* Vol PAS-98 No 2, 1979 p. 408-415.
- [4] Данилевич Я. Б., Карымов А. А.: Оценка сокращения «срока жизни» вала ротора турбогенератора. *Электричество* Номер 2, 1997г с36-40
- [5] Грабовский В. П.: Анализ повреждаемости валопроводов турбогенераторов, работающих в электроэнергетической системе. *Электричество* Номер 1, 2010г с39-42.
- [6] Przybysz J.: Turbogenerators, eksploatacja i diagnostyka. *WNT*, Warszawa, 1991 r., str. 182.
- [7] Przybysz J.: Identyfikacja sił elektromagnetycznych działających na wirnik oraz nietypowych rodzajów pracy i uszkodzeń turboszespołu. Projekt badawczy K015/T10/2001. Instytut Energetyki, Warszawa 2001 r.
- [8] Przybysz J.: Wykonanie obliczeń momentów skrętnych na wałach turboszespołu 200 MW występujących podczas rozmaitych zakłóceń elektrycznych. Instytut Energetyki, E/01/STAT/2004.
- [9] Przybysz J.; Wiśniewski J.: Momenty skrętne działające na wał turboszespołu podczas zakłóceń elektrycznych oraz ich monitorowania. *Energoserwis Lubliniec*, XIII Konferencja Energetyki „Energetyka – modernizacja i rozwój”, Kliczków 10-12 września 2003 r., str. 236-247.
- [10] Przybysz J.: Siły i momenty działające na wał turboszespołu podczas zakłóceń elektrycznych. Instytut Energetyki, E/01/STAT/2003.
- [11] EMTF Rule Book and Theory Book. Bonneville Power Administration, 1987.
- [12] Przybysz J.; Wiśniewski J.: Analiza momentów skrętnych na wale turboszespołu 1308 MVA. Instytut Energetyki, E/01/STAT/2015.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Przybysz, e-mail: jerzy.przybysz@ien.com.pl; Instytut Energetyki Instytut Badawczy, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa; dr inż. Józef Wiśniewski, e-mail: jozef.wisniewski@p.lodz.pl, Politechnika Łódzka Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź mgr inż. Marcin Biernacki, e-mail: marcin.biernacki@ien.com.pl, Instytut Energetyki Instytut Badawczy, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa.