

**Kazimierz ZAKRZEWSKI**

# PRACA SILNIKOWA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO PODCZAS AWARYJNEGO POŁĄCZENIA Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ

**STRESZCZENIE** *W pracy zwrócono uwagę na bieg synchroniczny generatora pracującego jako silnik w warunkach, kiedy wskutek awarii wyłącznika sieciowego jeden lub dwa bieguny pozostają w stanie zamkniętym. Określono wartość momentu maksymalnego, który teoretycznie może być rozwijany przez silnik w wymienionych stanach zasilania od strony sieci elektroenergetycznej. Założono, że strona GN transformatora blokowego jest połączona w gwiazdę z przewodem zerowym, strona DN w trójkąt.*

**Słowa kluczowe:** *maszyny synchroniczne, stany awaryjne*

**DOI:** 10.5604/01.3001.0009.4911

## 1. PRZYPADEK AWARYJNY ZASILANIA JEDNOFAZOWEGO

---

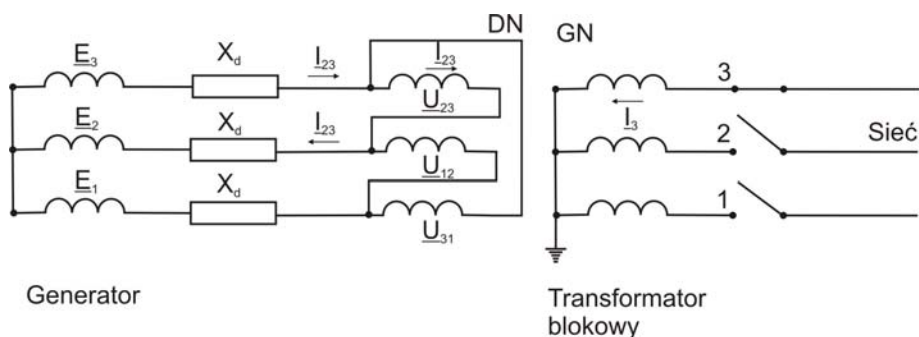
Przytoczony tutaj przypadek, który zdarzył się w praktyce kilkanaście lat temu [3], wystąpił podczas przygotowania do planowego zrzutu obciążenia w związku z zamiarem odstawienia turbozespołu z ruchu.

Wskutek losowej awarii jednego ramienia wyłącznika sieciowego, jedno z uzwojeń strony GN transformatora blokowego (przykładowo 3 na rys. 1) pozostawało pod napięciem fazowym sieci elektroenergetycznej. Uzwojenie transformatora po stronie DN jest połączone w trójkąt, przy czym po tej stronie występuje jednocześnie napięcie fazowe i przewodowe o wartości skutecznej  $U_{23}$ . Podczas przygotowania turbozespołu do planowanego odstawienia następuje odcięcie dopływu pary do turbiny. Brak momentu napędowego z zewnątrz powoduje przejście generatora do pracy silnikowej.

Następuje znaczne odzwabudzenie maszyny w porównaniu z pracą znamionową. Pobór mocy czynnej związany z napędem turbiny i pokryciem strat własnych wyniósł ok. 2 MW, pobór mocy biernej ok. 3 MVA. Zadziałanie wyłącznika zostało zasygnalizowane po uruchomieniu pierwszego stopnia systemu hydraulicznego. Niestety, nie przewidziano w konstrukcji wyłącznika sygnalizacji skutecznego zadziałania drugiego stopnia napędu, czyli właściwego rozejścia się styków wyłącznika wysokiego napięcia, co stało się tragiczne w dalszych skutkach. Faktem jest, że maszyna znalazła się w stanie zasilania jednofazowego od strony sieci i pozostawała nadal w stanie biegu synchronicznego.

---

**prof. dr hab. inż. Kazimierz ZAKRZEWSKI, dr h.c.**



Rys. 1. Układ połączeń sieci generatora w stanie awaryjnym

Przy zadanym obciążeniu, w warunkach zasilania trójfazowego, przejście do pracy przy zasilaniu maszyny od strony DN transformatora blokowego napięciem  $U_{23}$ , powoduje trzykrotny wzrost prądu  $I_{23}$  w uzwojeniu trójkątowym oraz prądu  $I_3$  po stronie GN. Nieprzerwany pobór prądu, a przede wszystkim stan synchronoskopu, wskazującego na pozostawanie maszyny w synchronizmie, byłyby tutaj czynnikami wskazującymi na awarię wyłącznika.

W przypadku, o którym mowa, takie sprawdzenie zostało pominięte, maszyna została odzwbudzona i przy zasilaniu napięciem  $U_{23}$  wypadła z synchronizmu, a następnie uległa uszkodzeniu. Rozmiary awarii poszerzyły się w wyniku uruchomienia przez zdezorientowaną obsługę przycisku bezpieczeństwa i pobudzeniu zabezpieczeń, które nie mogły już uratować generatora, transformatora, szynoprzewodów itp. całego bloku.

### 1.1. Analiza pracy w stanie awaryjnym

Turbina podczas odstawiania z ruchu może pracować ok. 4 minuty bez dopływu pary. W tym czasie obciążenie generatora w stanie pracy silnikowej mocą czynną stanowi ok. 1% mocy znamionowej. Pobór lub przekazywanie mocy biernej do sieci nie przekracza kilku procent. Przed fatalnym zadziałaniem wyłącznika, w warunkach zasilania trójfazowego, można wyróżnić dwa przypadki, kiedy maszyna pracując jako silnik:

- oddaje moc magnesującą do sieci (obciążenie czynno-indukcyjne)
- pobiera moc magnesującą z sieci (obciążenie czynno-pojemnościowe).

Przy zasilaniu jednofazowym po stronie GN transformatora blokowego zostaje nadal zachowany bieg synchroniczny. Eksperyment w skali laboratoryjnej przeprowadzony przez W. Partykę na maszynie małej mocy współpracującej z siecią niskiego napięcia potwierdził w pełni to przypuszczenie [2].

W niniejszej pracy zilustrujemy wykresy wskazowe dla maszyny dużej mocy przy zasilaniu spowodowanym awarią wyłącznika.

Odpowiednie wykresy wskazowe, dla przykładowego obciążenia maszyny o mocy znamionowej  $S_N = 235$  MVA,  $U_p = 15,75$  kV,  $\cos \varphi_N = 0,85$ ,  $X_d = 1,98 \Omega$ , przedstawiono na rysunku 2 dla przypadku a) i na rysunku 3 dla przypadku b). Moc czynna pobierana z sieci wynosi 2 MW, moc bierna w obu przypadkach a) i b) jest równa 3 MVA.

Pobór mocy chwilowej mierzony iloczynem składowej czynnej prądu  $I_{23}$  cz i napięcia zasilania  $U_{23}$  wyraża się zależnością:

$$P(\omega t) = -2 U_{23} I_{23 \text{ cz}} \sin^2(\omega t) = -U_{23} I_{23 \text{ cz}} (1 - \cos 2\omega t) \quad (1)$$

Zgodnie z przyjętą konwencją, znak minus oznacza moc silnikową w odróżnieniu od mocy dodatniej prądnicowej.

Wzór (1) opisuje pulsację mocy pobieranej z podwójną częstotliwością w odniesieniu do przebiegów napięcia i prądu, a przez to pulsację momentu na wale wokół wartości średniej  $P = -U_{23} I_{23 \text{ cz}}$ . W przypadku zasilania napięciem trójfazowym symetrycznym pulsacja mocy i momentu nie występuje.

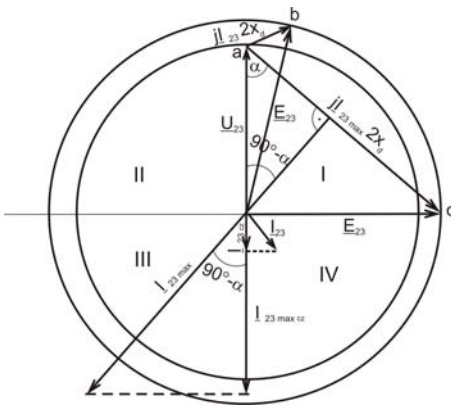
Uwzględniając sprawność generatora przy pracy silnikowej dla danego obciążenia  $\eta_1$  otrzymujemy moc na wale:

$$P_2 = -\eta_1 U_{23} I_{23 \text{ cz}} \quad (2)$$

oraz moment

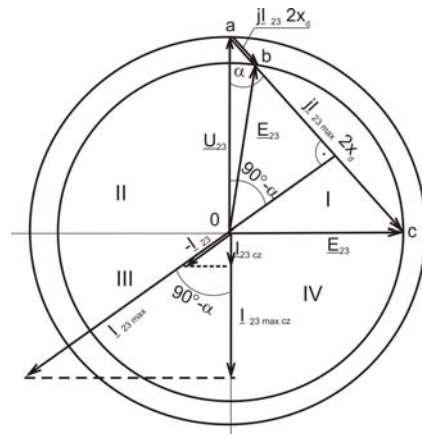
$$M_2 = -\eta_1 U_{23} I_{23 \text{ cz}} / 2 \pi n_1 \quad (3)$$

gdzie  $n_1$  oznacza prędkość synchroniczną.



Rys. 2. Wykresy wskazowe w przypadku  $E_{23} > U_{23}$

Rys. 2. Wykresy wskazowe w przypadku  $U_{23} > E_{23}$



Wykażemy na podstawie wykresów na rysunkach 2 i 3, że maszyna pracująca jako silnik może osiągnąć (gdyby taka potrzeba zaistniała) znacznie większy moment, przypadający dla kąta granicznego obciążenia  $\theta = \pi/2$ . Na podstawie wskazań  $\underline{E}_{23}$  i  $\underline{U}_{23}$ , które są w tym przypadku wzajemnie prostopadłe, określamy różnicę wektorową  $\underline{E}_{23}$  i  $\underline{U}_{23}$ , a następnie wartość modułu prądu  $I_{23 \max}$  według wzoru:

$$I_{23 \max} = |\underline{E}_{23} - \underline{U}_{23}| / 2 X_d \quad (4)$$

Określamy następnie kąt  $\varphi_1 = 90^\circ - \alpha$ , gdzie  $\text{tg } \alpha = E_{23}/U_{23}$ , a potem wyznaczamy wartość skuteczną składowej czynnej prądu:

$$I_{23 \max \text{ cz}} = |I_{23 \max} \cos \varphi_1| \quad (5)$$

Maksymalna moc czynna pobierana z sieci, określona wartością średnią wynosi:

$$P_2 = -U_{23} I_{23 \max \text{ cz}} \quad (6)$$

Moc na wale z uwzględnieniem sprawności dla tego stanu obciążenia  $\eta_2$ :

$$P_{2 \max} = -\eta_2 U_{23} I_{23 \max \text{ cz}} \quad (7)$$

Moment na wale wynosi:

$$M_{2 \max} = -\eta_2 U_{23} I_{23 \max \text{ cz}} / 2\pi n_1 \quad (8)$$

Znacznie prościej można obliczyć moment w przypadku, gdy podczas omawianego zasilania awaryjnego, napięcie sieci po stronie DN transformatora i siła elektromotoryczna generatora są sobie równe tzn.  $\underline{U}_{23} = \underline{E}_{23}$ .

Wtedy:

$$P_{\max} = -(U_{23})^2 / 2 X_d \quad (9)$$

$$P_{2 \max} = -\eta_2 (U_{23})^2 / 2 X_d \quad (10)$$

$$M_{2 \max} = -\eta_2 (U_{23})^2 / 4\pi n_1 X_d \quad (11)$$

Przyjmując, że sprawność  $\eta_2$  jest bliska 1, otrzymuje się:

$$M_{2 \max} = -(U_{23})^2 / 4\pi n_1 X_d \quad (12)$$

Dla danych  $U_{23} = U_p = 15,75 \text{ kV}$ ,  $X_d = 1,98 \Omega$ ,  $n_1 = 50 \text{ 1/s}$  otrzymujemy:

$$M_{2 \max} = (15,75 \cdot 10^3)^2 / (4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,98) = 1,99 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

Moment elektromagnetyczny znamionowy przy pracy prądnicowej, zbliżony do momentu przy pracy silnikowej wynosi:

$$M_N = S_N \cos \varphi_N / (2 \cdot \pi \cdot n_1) = 235 \cdot 10^6 \cdot 0,85 / (2 \cdot \pi \cdot 50) = 6,36 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

Moment maksymalny który może rozwinąć silnik  $M_{2 \max}$  stanowi zatem ok. 31% momentu znamionowego  $M_N$ .

## 2. PRZYPADEK AWARYJNY ZASILANIA DWUFAZOWEGO

Przy zasilaniu dwufazowym, jak na rysunku 1, w założeniu dodatkowego zamknięcia bieguna 2 po stronie GN transformatora, pojawiają się prądy w uzwojeniach 2 i 3 po stronie GN transformatora oraz w uzwojeniach między zaciskami 2 i 3 oraz 1 i 2 po stronie DN. Przejście na pracę dwufazową powoduje, że prądy w tych uzwojeniach wzrastają w stosunku 3/2 w porównaniu z występującymi w stanie symetrycznej pracy trójfazowej. Moc czynna pobierana przez generator będzie równa:

$$P_2 = -2 U_{23} I_{23 \text{ cz}} [\sin^2 \omega t + \sin^2 (\omega t + 120^\circ)] \quad (13)$$

Przebieg tej funkcji ma charakter pulsujący od wartości  $-U_{23} I_{23 \text{ cz}}$  do wartości  $-3U_{23} I_{23 \text{ cz}}$ , przy czym wartość średnia wynosi  $-2U_{23} I_{23 \text{ cz}}$ . Przy zachowaniu tego samego poboru mocy czynnej i biernej jak w przypadku 1 przed zadziałaniem wyłącznika, prąd  $I_{23}$  będzie dwa razy mniejszy ze względu na to, że przenoszenie mocy czynnej i biernej odbywa się poprzez dwa uzwojenia fazowe transformatora blokowego. Pulsacja mocy i momentu będzie mniejsza i będzie następować w granicach od 0, 5 do 1, 5 wartości średniej. Można w tym przypadku sporządzić podobne wykresy wskazowe jak na rysunkach 3 i 4, zarówno dla napięcia  $\underline{U}_{23}$  i siły elektromotorycznej  $\underline{E}_{23}$ , jak też napięcia  $\underline{U}_{12}$  i siły  $\underline{E}_{12}$ .

Podobne rozumowanie jak w p.1.1 przeprowadzamy w celu określenia mocy czynnej i momentu maksymalnego, który może rozwinąć teoretycznie generator przy pracy silnikowej. Moc ta i moment będą dwa razy większe niż w przypadku zasilania jednofazowego.

Wzory (7) i (8) przybiorą postać:

$$P_{2 \max} = -2\eta_2 U_{23} I_{23 \max \text{ cz}} \quad (14)$$

$$M_{2 \max} = -2\eta_2 U_{23} I_{23 \max \text{ cz}} / 2\pi n_1 \quad (15)$$

Przyjmując sprawność bliską jedności oraz  $\underline{U}_{23} = \underline{E}_{23}$  oraz  $\underline{U}_{12} = \underline{E}_{12}$  wzór (12) można zapisać następująco:

$$M_{2 \max} = -(U_{23})^2 / 2\pi n_1 X_d \quad (16)$$

Dla tych samych danych jak w p.1.1 otrzymujemy  $M_{2 \max} = 3.98 \cdot 10^5$  Nm, czyli ok. 63% momentu znamionowego.  
Zapas momentu jest bardzo duży.

### 3. WNIOSKI

---

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, generator synchroniczny przy pracy silnikowej, w warunkach zasilania jednofazowego po stronie GN transformatora blokowego, ma stosunkowo duży zapas momentu o wartości średniej, umożliwiający w dalszym ciągu pracę synchroniczną maszyny. Moment ten wykazuje głębokie pulsacje od wartości bezwzględnej równej zero do podwójnej wartości momentu średniego. W przypadku zasilania dwufazowego, pulsacje te następują w granicach od 0,5 do 1,5 wartości średniej. Bieg synchroniczny jest tym bardziej zapewniony ze względu dwa razy większy zapas momentu elektromagnetycznego.

Potwierdzeniem biegu synchronicznego w eksploatacji jest stan synchronoskopu, który mimo sygnalizacji wskazującej na pełne otwarcie wyłącznika sieciowego pozwala przypuszczać, że silnik jest w dalszym ciągu pod napięciem.

Wobec tego, że turbina może pracować bez przepływu pary przez ok. 4 minuty istnieje wystarczający czas na podjęcie decyzji o rozłączeniu maszyny z siecią za pomocą odpowiedniego odłącznika np. odłącznika systemowego, gdyż pobierane prądy przed odstawianiem turbozespołu z ruchu są stosunkowo małe.

### LITERATURA

1. Jezierski E.: Maszyny synchroniczne, PWT, Warszawa 1951.
2. Partyka W.: Analiza zachowania się synchronoskopu w procesie odstawiania bloku energetycznego (Analiza wskazań synchronoskopu bloku Nr 5 w trakcie awarii z dnia 25. 12. 1998 r.).
3. Zakrzewski K.: Opinia dotycząca przyczyn, przebiegu, skutków oraz możliwości uniknięcia awarii na bloku Nr 5 Elektrowni Turów, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Politechniki Łódzkiej, 2003 r.

THE MOTOR WORK OF SYNCHRONOUS GENERATOR  
DURING SINGLE-AND DOUBLE-PHASE SUPPLY FROM  
ELECTRICAL NETWORK

Kazimierz ZAKRZEWSKI

**ABSTRACT** *The paper deals with the synchronous run of three – phase generator which works as a motor during single- and double-phase supply from electrical network. The maximal torque of the motor in this states was defined. The generator transformer connection is: HV winding-star with neutral conductor, LV winding-triangle.*

**Key words:** *synchronous machines, breakdown state*

**Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski** studiował na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej w latach 1954-1959 uzyskując tytuł zawodowy mgra inż. elektryka. W Politechnice Łódzkiej przepracował nieprzerwanie 54 lata. Stopień doktora uzyskał w 1968 r. Habilitował się na macierzystym Wydziale w 1972 r. Tytuł naukowy profesora nadała mu Rada Państwa w 1983 r. Profesorem zwyczajnym Politechniki Łódzkiej został w 1992 r. Doktor honoris causa Politechniki Opolskiej (2013 r.). Był specjalistą w dziedzinie maszyn elektrycznych i transformatorów. Współautor książek: "Analiza i synteza pól elektromagnetycznych" (pod red. J. Turowskiego), wyd. Ossolineum 1990 r. i "Computational magnetics" (pod red. J. Sykulskiego), wyd. Chappman and Hall 1991 r. Autor ponad 230 publikacji naukowych w czasopismach krajowych i zagranicznych oraz w materiałach konferencyjnych z tematyki wchodzącej w zakres elektrodynamiki maszyn elektrycznych i transformatorów, zjawisk polowych w materiałach ferromagnetycznych, modelowania fizycznego i matematycznego urządzeń elektrycznych. Laureat wielu nagród państwowych.



Współpracował wiele lat z fabrykami przemysłu elektromaszynowego w Polsce (m.in. ELTA-Łódź, EMIT-Żychlin, DOLMEL-Wrocław, BOBRME-Komel Katowice) oraz wykonywał ekspertyzy dla przemysłu (Huta Łaziska, Kopalnia Węgla Brunatnego Adamów i in.).

Wygłaszał wykłady m in. w Uniwersytetach: Southampton i Strathclyde (Wielka Brytania), Vigo (Hiszpania), Leuven i Liege (Belgia), Pawia (Włochy), na Politechnice w Kijowie oraz w Łotewskiej Akademii Nauk w Rydze.

Był członkiem Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów Naukowych w latach 2000-2012. Profesor zmarł 13 września 2016 roku.

