

Ryszard NAWROWSKI*
Zbigniew STEIN*
Maria ZIELIŃSKA*

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA PRĄDNIC SYNCHRONICZNYCH W ZESPOŁACH PRĄDOTWÓRCZYCH (SPALINOWO-ELEKTRYCZNYCH)

W referacie przedstawiono przy wykorzystaniu programu Mcad, możliwości wykorzystywania prądnic synchronicznych, zwłaszcza mniejszych mocy, w agregatach prądotwórczych awaryjnego zasilania różnego rodzaju obiektów. Przedstawiono wyniki wybranych obliczeń i przeprowadzono ich analizę.

SŁOWA KLUCZOWE maszyny elektryczne, maszyna synchroniczna

1. WPROWADZENIE

Maszyny synchroniczne w tzw. ujęciu silnoprądowym (energetycznym), są wykorzystywane jako prądnice lub silniki. O ile silniki muszą być zawsze połączone ze źródłem zasilania, w układach napędowych źródłem tym, praktycznie zawsze, jest sieć elektroenergetyczna, o tyle prądnice muszą być wyposażone w urządzenie, które nada wirnikowi prądnicy ruch obrotowy, czyli będzie wirnik napędzało. Prądnice synchroniczne największe zastosowanie znalazły w elektrowniach, w których są powszechnie stosowane pod nazwą „generatory”, napędzane turbinami parowymi lub wodnymi. Aktualnie duże znaczenie mają prądnice synchroniczne w tzw. zespołach prądotwórczych, w których są napędzane silnikami spalinowymi. Zespoły prądotwórcze, zaliczane do źródeł awaryjnego zasilania energią elektryczną różnego rodzaju obiektów, są coraz powszechniej stosowane, między innymi z tego powodu, że np. wysokie budynki muszą być wyposażone w źródła awaryjnego zasilania energią elektryczną. Zespoły prądotwórcze, w których do napędzania prądnicy wykorzystywane są silniki spalinowe, nie wymagają ograniczeń co do mocy i długości czasu użytkowania. Istotny jest tylko odpowiednio duży zbiornik paliwa. Zespoły te są przystosowane do niemal natychmiastowego użytkowania po zaniku napięcia w sieci elektroenergetycznej. Prądnice synchroniczne są o tyle

* Politechnika Poznańska.

uniwersalne, że mogą pracować samotnie (indywidualnie), albo w sieci elektroenergetycznej. W zależności od tego jak mają być użytkowane, różne są ich właściwości eksploatacyjne. Prądnice synchroniczne w elektrowniach, praktycznie zawsze, pracują równolegle z innymi prądnicami i są przyłączone do sieci elektroenergetycznej. Prądnice w zespołach prądotwórczych zwykle pracują samotnie (indywidualnie) i nie są połączone z siecią elektroenergetyczną. Sposób pracy prądnicy, samotnie czy w sieci, w istotny sposób wpływa na jej działanie. Prądnica pracująca samotnie, dla utrzymania standardowych parametrów wyjściowych, czyli wartości napięcia i częstotliwości, musi posiadać sprawnie działający układ regulacji prędkości obrotowej oraz układ regulacji prądu wzbudzenia. Obciążenie prądnicy zależy wyłącznie od parametrów przyłączonych do niej odbiorników. Moc silnika napędowego musi być tak dobrana, aby w granicach przewidywanego obciążenia prądnicy mocą czynną, regulator prędkości był zdolny do utrzymywania stałej jej wartości, czyli by utrzymywał znamionową wartość częstotliwości napięcia. Regulator prądu wzbudzenia musi być tak dobrany, aby przy wszystkich zmianach obciążenia prądnicy, mocą czynną i bierną, wartość napięcia pozostawała zgodna z wymaganiami. Prądnice synchroniczne pracujące w sieci, po zsynchronizowaniu, mają prędkość obrotową odpowiadającą częstotliwości sieci. Regulacja prądu wzbudzenia, tylko przed synchronizacją, służy do nastawiania wartości napięcia. Po synchronizacji, co jest cenną zaletą prądnicy synchronicznej, zmiana wartości prądu wzbudzenia wpływa wyłącznie na wartość mocy biernej oddawanej do sieci. Przy tzw. „przewzbudzeniu”, kiedy prąd wzbudzenia jest odpowiednio duży, do sieci oddawana jest moc bierna indukcyjna. Przy małej wartości prądu wzbudzenia, czyli przy tzw. niedowzbudzeniu, do sieci oddawana jest moc bierna pojemnościowa. W większości przypadków, prądnice synchroniczne przyłączone do sieci, pracują przy przewzbudzeniu, czyli oddają do sieci moc bierną indukcyjną. Podobne zasady obowiązują dla silników synchronicznych. W takich przypadkach, maszyny synchroniczne pracują podobnie jak kondensatory, czyli służą jako kompensatory mocy biernej.

Podczas pracy autonomicznej (samotnej) o pracy prądnicy decyduje silnik napędowy oraz odbiornik o różnym charakterze, R, L lub C. Odbiorniki, do pracujących autonomicznie prądnic, najczęściej przyłączane są w układzie czteroprzewodowym, czyli z przewodem neutralnym. Taki sposób przyłączania odbiorników umożliwia ich pracę w układzie jednofazowym lub trójfazowym niesymetrycznym. Układ regulacji (nastawiania) prądu wzbudzenia umożliwia nastawianie napięcia prądnicy. Układ regulacji prądu wzbudzenia umożliwia stabilizację wartości napięcia, czyli utrzymywanie stałej jej wartości niezależnie od zmian obciążenia. Należy mieć na uwadze, że przy wzroście obciążenia o charakterze czynnym (rezystancyjnym) oraz indukcyjnym prąd wzbudzenia należy zwiększać natomiast przy wzroście obciążenia pojemnościowego prąd wzbudzenia należy zmniejszać. Jest to znane zjawisko nazywane

oddziaływaniem pola twornika. Podczas pracy samotnej prądnicy istotne znaczenie ma regulator prędkości obrotowej silnika napędowego, która decyduje o wartości częstotliwości napięcia wyjściowego prądnicy. Przy każdej zmianie obciążenia prądnicy regulator prędkości musi szybko stabilizować wartość prędkości, by wartość częstotliwości napięcia była stała. Niesymetryczny odbiornik powoduje w maszynie stan niesymetryczny, który niekorzystnie wpływa na pracę maszyny. Analiza pracy prądnicy w stanie niesymetrycznym wymaga posługiwania się nietypowymi równaniami z wykorzystaniem zwykle metody składowych symetrycznych.

2. UNORMOWANIA PRAWNE

Warunki pracy prądnic w Zespołach Prądotwórczych są dość szczegółowo omówione w kilku różnego rodzaju normach i przepisach. W rozporządzeniu Ministra podano, że wartość średnia częstotliwości mierzonej przez 10 sekund, powinna być zawarta w przedziale: 50 Hz +/- 1% przez 95 % tygodnia lub 50 Hz +4%/-6% przez 100% tygodnia, natomiast w każdym tygodniu 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego powinno mieścić się w przedziale odchyżeń +/- 10%. W normie dotyczącej agregatów prądotwórczych, nie trakcyjnych, zapisano, że charakterystyki częstotliwości w stanach ustalonych zależą przede wszystkim od własności regulatora prędkości obrotowej silnika, natomiast charakterystyki w stanach dynamicznych zależą od właściwości wszystkich elementów systemu. Równocześnie podano, że charakterystyki napięcia zespołu prądotwórczego zależą głównie od konstrukcji prądnicy oraz od właściwości automatycznego regulatora napięcia. Graniczne wartości eksploatacyjne zależą od klasy wymagań zespołu prądotwórczego, które są podzielone na: G1, G2, G3 lub G4.

Spadek częstotliwości dla zespołu klasy G1 nie powinien przekraczać 8%, dla klasy G2 5%, a 3% dla klasy G3. Dla zespołu klasy G4 spadek częstotliwości powinien być przedmiotem uzgodnienia między producentem a zamawiającym. Odchyłka napięcia w stanach ustalonych, zależnie od klasy zespołu, nie może przekraczać wartości +/- 10% w przypadku małych jednostek (do 10 kVA) klasy G1, a wartości +/- 1% w zespołach klasy G3. Odchyłka napięcia dla zespołu klasy G4 powinna być przedmiotem uzgodnienia między producentem a zamawiającym.

W każdym przypadku pracy prądnic należy kontrolować natężenia fazowych prądów twornika, głównie z dwóch powodów:

- a) żeby nie przekraczać znamionowej wartości prądów,
- b) aby przy niesymetrii obciążenia nie przekraczać wartości wskaźnika stopnia niesymetrii prądów ($I_2/I_n < 0,1$). Gdzie I_2 jest składową symetryczną kolejności przeciwnej trójfazowego układu prądów.

3. ZASADY OBLICZEŃ

Znając wartości fazowych prądów twornika I_u , I_v , I_w składową symetryczną kolejności przeciwnej prądów twornika (I_2) można obliczać wg wzoru:

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_u + a^2 I_v + a I_w)$$

w którym a oraz a^2 są operatorami obrotu natomiast I_u , I_v oraz I_w są zespolonymi prądami fazowymi twornika. Zespolona forma prądu ma postać $I \exp-j\varphi$.

Podczas obciążenia jednofazowego stopień niesymetrii I_2/I_n zależy od wartości względnej prądu obciążenia (I_{obc}/I_n), bo $I_2/I_n = 1/3(I_{obc}/I_n + 0 + 0)$.

Przy trójfazowym obciążeniu niesymetrycznym, stopień niesymetrii zwykle jest mniej niekorzystny niż przy obciążeniach jednofazowych bo zależy od wartości obciążeń w poszczególnych fazach.

Przy trójfazowym obciążeniu niesymetrycznym, stopień niesymetrii zwykle jest mniej niekorzystny i zależy od wartości obciążeń w poszczególnych fazach. Przy trójfazowym obciążeniu niesymetrycznym, stopień niesymetrii zwykle jest mniej niekorzystny i zależy od wartości obciążeń w poszczególnych fazach. W normach podano, że prądnice nie powinny być obciążane prądem większym od znamionowego oraz, że stosunek składowej przeciwnej prądu do prądu znamionowego nie powinien być większy niż 0,08 lub 0,1, natomiast stosunek składowej przeciwnej lub zerowej prądu do składowej zgodnej nie powinien przekraczać 0.05. Wartości tych wskaźników oblicza się z zależności:

$$I_1 = \frac{I_u + a^2 I_v + a I_w}{3} \quad I_2 = \frac{I_u + a I_v + a^2 I_w}{3}$$

Przy analizowaniu warunków pracy prądnicy synchronicznej w stanach niesymetrycznych dogodnie jest posługiwanie się metodą składowych symetrycznych dla których schematy zastępcze dla poszczególnych składowych przedstawiono na rys. 1.

Składowe symetryczne kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej odbiornika oblicza się ze wzoru

$$\begin{pmatrix} Z_1(k_f) \\ Z_2(k_f) \\ Z_0(k_f) \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{zu}(k_f) \\ Z_{zv}(k_f) \\ Z_{zw}(k_f) \end{pmatrix}$$

Składowe symetryczne kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej prądów fazowych oblicza się według wzorów:

$$I_{sym} = \frac{U_{sym}}{Z_{sym}}$$

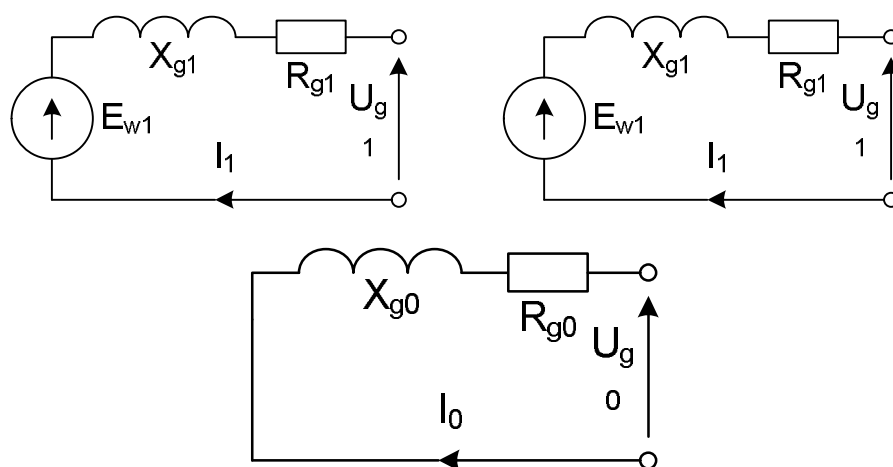
Napięcia składowych symetrycznych kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej oblicza się wg. wzorów:

$$U_1 = E_1 - I_1 Z_1$$

$$U_2 = E_2 - I_2 Z_2$$

$$U_0 = E_0 - I_0 Z_0$$

Ze względu na ograniczoną ilość miejsca, nie przedstawiono szczegółowo wzorów niezbędnych do koniecznych obliczeń.



Rys. 1. Schematy zastępcze maszyny synchronicznej dla składowej symetrycznej kolejności, zgodnej, przeciwnej i zerowej

W normach podano, że prądnice nie powinny być obciążane prądem większym od znamionowego oraz, że stosunek składowej przeciwnej prądu do prądu znamionowego nie powinien być większy niż 0,08 lub 0,1, natomiast stosunek składowej przeciwnej lub zerowej prądu do składowej zgodnej nie powinien przekraczać 0,05. Wartości tych wskaźników oblicza się z zależności I_2/I_n mniejsze od 0,1 oraz I_2/I_1 mniejsze od 0,05.

$$\frac{|I_2(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|}{|I_1(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|}$$

Wskaźnik niesymetrii napięć najłatwiej można obliczać ze wzoru, w którym występują tylko wartości napięć międzyfazowych

$$k_{nu} = \sqrt{6 \frac{U_{uv}^2 + U_{vw}^2 + U_{wu}^2}{(U_{uv} + U_{vw} + U_{wu})^2} - 2}$$

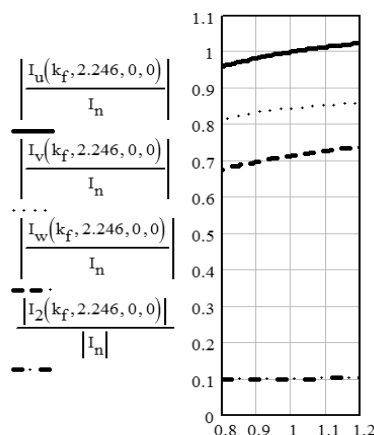
4. WYBRANE WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia wykonano dla prądnicy o mocy 250 kVA, ~ 400 V. W tabeli 1 zestawiono dla przykładu obliczone wartości prądów i napięć fazowych oraz stosunek składowej przeciwnej napięcia do składowej zgodnej w funkcji prądu wzbudzenia.

Tabela 1. Wartości napięć i prądów przy różnych wartościach prądów wzbudzenia

k_f	Faza pierwsza		Faza druga		Faza trzecia		U_2/U_1
	A	U/U_n	A	U/U_n	A	U/U_n	
0,95	222,4	0,963	226,4	0,980	219,9	0,952	0,018
1,00	228,1	0,985	238,7	1,003	239,2	0,973	0,019
1,05	232,5	1,007	237,2	1,027	229,4	0,993	0,020

Natomiast na rysunku 2 przedstawiono przebiegi prądów w funkcji prądu wzbudzenia



Rys. 2. Przebiegi prądów fazowych i składowej symetrycznej kolejności przeciwnej w funkcji prądu wzbudzenia

5. WNIOSKI

Wyniki symulacji różnych stanów niesymetrycznych są trudne do porównywania, ponieważ normy nie określają dopuszczalnego obciążenia prądem poszczególnych uzwojeń, ograniczając się wyłącznie do wymagania ograniczenia wartości składowej przeciwnej. Zestawiono najbardziej charakterystyczne wyniki symulacji obciążeń niesymetrycznych prądnicy małej mocy. Pokazano, że wymagania obowiązujących przepisów w zakresie obciążeń niesymetrycznych są tak mało precyzyjne, że spełniając przepisy dotyczące dopuszczalnej wartości stosunku składowej symetrycznej kolejności przeciwnej

do prądu znamionowego można w uzwojeniach prądnicy wymuszać różne rozpięty prądów. Rozpięty te powodują występowanie różnych wartości strat mocy w uzwojeniach, a tym samym różnego ich nagrzewania. Ponieważ podczas trójfazowych obciążeń prądnicy wartość stosunku $I_2/I_n = 0,1$ zależy od wielu zmiennych, przyłączając odbiornik trudno przewidywać, przy jakich wartościach prądów w poszczególnych uzwojeniach uzyska się wymaganą wartość tego stosunku. Koniecznością wydaje się wprowadzenie wymagania, że całkowite straty mocy w uzwojeniach nie mogą przekraczać wartości znamionowej tych strat. Za łatwy do zdefiniowania można by uznawać tylko przypadek niesymetrycznego obciążenia jednofazowego, przy którym stosunek $I_2/I_n = 0,1$ występuje przy prądzie obciążenia wynoszącym 0,3 znamionowego prądu twornika. W takim jednak przypadku, spełniającym wymagania przepisów, prądnica jest w wyraźny sposób niedociążona.

LITERATURA

- [1] PN-EN 61000-2-2/2-4: 2003(U) Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Poziomy kompatybilności zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych – w publicznych sieciach zasilających niskiego napięcia.
- [2] PN-EN 60034-1: 2005 Maszyny elektryczne wirujące. Dane znamionowe i parametry.
- [3] PN-EN 60034-22: 2000 Maszyny elektryczne wirujące. Prądnice prądu przemiennego do zespołów prądotwórczych napędzanych tłokowymi silnikami spalinowymi.
- [4] PN-EN 60349-1: 2004 Trakcja elektryczna. Elektryczne maszyny wirujące do pojazdów szynowych i drogowych. Część 1: Maszyny inne niż silniki prądu przemiennego zasilane z przekształtników elektronicznych.
- [4] Stein Z. Zielińska M. Równania wyjściowe do analizy warunków pracy autonomicznej trójfazowej prądnicy synchronicznej w stanach niesymetrycznych. Materiały Symposium ZKwE, Poznań, 2006.
- [5] ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI I PRACY z dnia 20 grudnia 2004 r. W sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznej, ruchu i eksploatacji tych sieci.

ANALYSIS OF POSSIBLE APPLICATION OF A SYNCHRONOUS GENERATOR TO FUEL-ELECTRIC GENERATOR SETS

The paper presents possible use of a synchronous generator, particularly of low power, in the generator sets designed as backup power to various types of equipment. Selected computation trials have been carried out with the Mcad software and subjected to analysis