7.4. Praca równoległa maszyn synchronicznych

7.4.1. Wiadomości ogólne

Pracą równoległą maszyn synchronicznych nazywa się taką pracę, przy której maszyny synchroniczne są przyłączone do wspólnej sieci, którą najczęściej stanowi ogólnopaństwowy, a nawet międzynarodowy, system sieci przesyłowych.

Potrzeba pracy równoległej wynika:

- z ograniczonych mocy pojedynczych prądnic w porównaniu z mocą, na jaką istnieje zapotrzebowanie (w Polsce moc jednostkowa to ok. 200 MW, a zapotrzebowanie całego kraju ok. 30 000 MW);
- z konieczności zapewnienia rezerwy zasilania odbiorcom w przypadku remontu lub awarii;
- z możliwości bardziej racjonalnego dostosowywania mocy do aktualnego zapotrzebowania oraz rozpływu mocy czynnych i biernych w sieci elektroenergetycznej.

Z podanych względów prądnice synchroniczne bardzo rzadko pracują indywidualnie. Zdarza się to praktycznie tylko w bardzo małych elektrowniach oddalonych od jakichkolwiek układów energetycznych, w urządzeniach transportowych oraz w laboratoriach badawczych.

Konieczność zapewnienia stabilności i rezerwy zasilania powoduje, że moc jednej prądnicy, która pracuje na wspólną sieć nie przekracza 5÷10% sumy mocy pozostałych prądnic. W tej sytuacji napięcie i częstotliwość sieci praktycznie nie zależą od zmian pracy tej prądnicy, wynikających ze zmiany prądu wzbudzenia lub momentu napędowego. Sieć, w której napięcie i częstotliwość są stałe, nazywa się **siecią sztywną**. W dalszej części, jeżeli będzie mowa o pracy równoległej maszyn synchronicznych, to będzie to dotyczyć współpracy prądnicy z siecią sztywną.

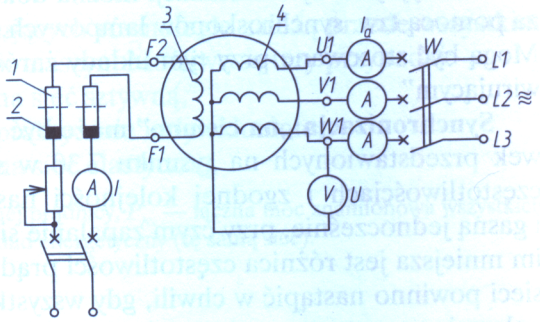
W praktyce ruchowej istotne są dwa zagadnienia:

- sposoby przyłączania prądnic do pracy równoległej,
- właściwości ruchowe prądnic w typowych przypadkach pracy równoległej.

7.4.2. Sposoby przyłączania prądnic do pracy równoległej

Podczas przyłączania prądnicy synchronicznej do pracy równoległej z siecią należy pamiętać, aby w chwili zamykania wyłącznika *W* (**rys. 7.29**) między prądnicą a siecią nie popłynął prąd. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy potencjały obu biegunów wyłącznika są jednakowe. Osiągnięcie takiego stanu wymaga spełnienia następujących warunków:

- $U_{L1} = U_U$, $U_{L2} = U_V$, $U_{L3} = U_W$ — wartości skuteczne napięć indukowanych w prądnicy i napięć sieci muszą być równe;
- $f_s = f_p$ — częstotliwości napięć sieci i prądnicy muszą być jednakowe;
- $\alpha = 0$ — napięcie w prądnicy i napięcie w sieci muszą być ze sobą w fazie;
- kolejność następstwa faz napięć sieci i napięć prądnicy musi być jednakowa;
- kształt krzywych obu napięć powinien być taki sam (warunek ten w praktyce jest zawsze spełniony z dostateczną dokładnością).

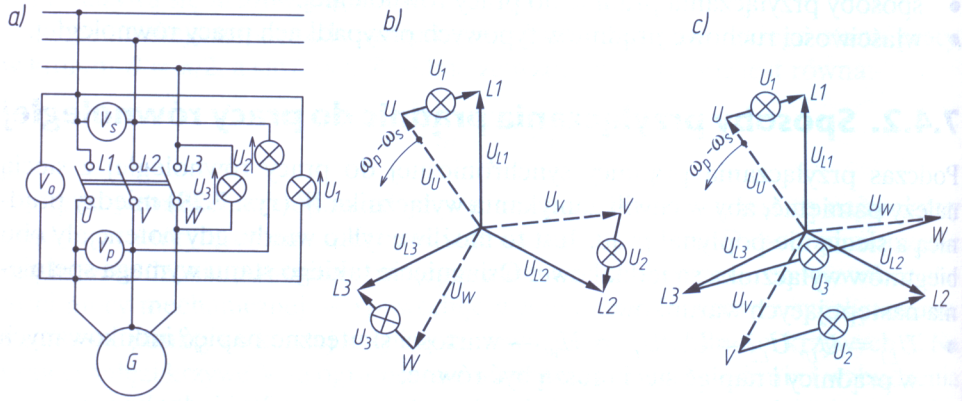


Rys. 7.29. Schemat połączeń prądnicy synchronicznej przyłączonej do sieci sztywnej
1 — pierścienie ślizgowe, *2* — szczotki, *3* — uzwojenie wzbudzające, *4* — uzwojenie twornika

Warunki te nazywa się **warunkami synchronizacji**, a uchwycenie chwili włączenia prądnicy do sieci przy spełnieniu tych warunków nazywa się **synchronizacją**.

Aby spełnić warunki synchronizacji, należy regulować prędkość obrotową turbiny napędzającej prądnicę oraz prąd wzbudzenia. W praktyce przy synchronizacji generatora z siecią nie można otrzymać idealnie równych częstotliwości f_s i f_p, ale częstotliwość prądnicy f_p należy możliwie jak najbardziej zbliżyć do wartości częstotliwości sieci f_s, czyli uzyskać powolne wirowanie wektora

U_U i U_{L1} (**rys. 7.30b**). Przy niewielkiej różnicy częstotliwości f_p i f_s oraz przy zgodnej kolejności następstwa faz gwiazda napięć U_U, U_V, U_W indukowanych w prądnicy wiruje powoli względem gwiazdy napięć U_{L1}, U_{L2} i U_{L3} sieci (rys. 7.30b). W chwili, gdy pokrywają się odpowiednie wektory gwiazd napięć, napięcia na biegunach wyłącznika są równe zero. Gdyby kolejność następstwa faz w prądnicy i w sieci nie była zgodna, gwiazdy napięć prądnicy i sieci miałyby położenie jak na **rysunku 7.30c**. Wtedy nie wystąpiłaby taka chwila, w której potencjały obu biegunów wyłącznika byłyby jednakowe we wszystkich fazach.



Rys. 7.30. Układ synchronizacyjny „na ciemno" [20]: a) układ połączeń; b) wykres wektorowy dla $f_s \neq f_p$ i zgodnej kolejności faz, przy czym $\omega_s = 2\pi f_s$, $\omega_p = 2\pi f_p$; c) wykres wektorowy dla $f_s \neq f_p$ i przeciwnej kolejności faz

W praktyce ruchowej są stosowane najrozmaitsze rozwiązania urządzeń synchronizacyjnych. Synchronizacji można dokonać w sposób prosty i niezawodny za pomocą tzw. synchroskopów lampowych, składających się z układu żarówek. Mogą być stosowane przy tym układy żarówek „na ciemno" lub „ze światłem wirującym".

Synchronizacja „na ciemno" może być dokonana za pomocą układu żarówek przedstawionych na rysunku 7.30 w sposób następujący: przy równych częstotliwościach i zgodnej kolejności następstwa faz żarówki zapalają się i gasną jednocześnie, przy czym zapalanie się i gaśnięcie jest tym powolniejsze, im mniejsza jest różnica częstotliwości prądnicy i sieci. Włączenie prądnicy do sieci powinno nastąpić w chwili, gdy wszystkie żarówki zgasną i woltomierz V_0 wskazuje zero.

Żarówki są rozmieszczone w synchroskopie na okręgu po to, aby można było lepiej śledzić ich zapalanie się i gaśniecie. Zapalanie i gaśnięcie kolejno żarówek świadczy o różnej kolejności następstwa faz napięć prądnicy i sieci. Wówczas w celu doprowadzenia do zgodnej kolejności następstwa faz wystarczy zamienić kolejność podłączania przewodów wyprowadzonych z prądnicy (np. U z V).

Omówiony schemat synchroskopu jest uproszczony — w praktyce spotyka się synchroskopy, w których układy żarówek są zastąpione układami elektromagnetycznymi.

Synchronizację można przeprowadzić ręcznie, półautomatycznie lub automatycznie. Układy synchronizacyjne w pełni automatyczne stosuje się coraz częściej, mimo że są one bardzo drogie i skomplikowane.

Samosynchronizacja

Synchronizacja polega na włączeniu do sieci prądnicy wzbudzonej i doprowadzonej do stanu synchronizmu, natomiast **samosynchronizacja** polega na przyłączeniu do sieci prądnicy niewzbudzonej (uzwojenie wzbudzające jest zwykle zwarte przez rezystor) i doprowadzonej do prędkości bliskiej prędkości synchronicznej. Włączenie prądnicy do sieci metodą samosynchronizacji wymaga stwierdzenia, czy po zasileniu uzwojenia wzbudzającego napięciem o określonej biegunowości, przy określonym kierunku wirowania prądnicy, kolejność faz napięć sieci i prądnicy będzie zgodna. Zastosowanie samosynchronizacji pozwala znacznie skrócić czas przyłączania prądnic do pracy równoległej. Koszt układu automatycznej samosynchronizacji jest znacznie niższy niż koszt układu automatycznej synchronizacji.

Samosynchronizację można stosować wtedy, gdy trudne jest spełnienie warunków synchronizacji dokładnej. Dołączenie wzbudzonego generatora do sieci bez precyzyjnie spełnionych warunków synchronizacji może spowodować popłynięcie dużych prądów łączeniowych, co może być niebezpieczne dla prądnicy. W takiej sytuacji korzystniejsze może się okazać dołączenie prądnicy metodą samosynchronizacji.

7.4.3. Właściwości ruchowe prądnicy przy pracy równoległej

Właściwości ruchowe prądnic pracujących równolegle zależą przede wszystkim od stosunku mocy współpracujących maszyn. Możliwe są trzy przypadki:

1. $P_{Np} << P_{Ns}$ — prądnica pracuje na sieć sztywną,
2. $P_{Np} >> P_{Ns}$ — prądnica pracuje praktycznie indywidualnie,
3. $P_{Np} \approx P_{Ns}$ — prądnica pracuje na sieć elastyczną,

gdzie: P_{Np} — moc znamionowa rozpatrywanej prądnicy, P_{Ns} — łączna moc znamionowa wszystkich pozostałych prądnic zasilających ten sam układ energetyczny (tę samą sieć).

Praca na sieć sztywną

Jeżeli moc pracującej w sieci prądnicy P_{Np} jest znikomo mała w porównaniu z mocą sieci sztywnej, traktowanej jako prądnica zastępcza o mocy P_{Nz}, to o wartości parametrów charakterystycznych sieci, a więc napięcia i częstotliwości, decyduje prądnica zastępcza o dużej mocy. Napięcie i częstotliwość rozpatrywanej prądnicy o mocy P_{Np} są zadane z zewnątrz i wartości ich nie zależą od jakichkolwiek zmian dokonywanych w tej prądnicy (regulacja wzbudzenia i regulacja mocy maszyny napędzającej) tak długo, jak długo maszyna utrzyma się w stanie synchronizmu. Pracę maszyny w tych warunkach nazywa się **pracą na sieć sztywną**.

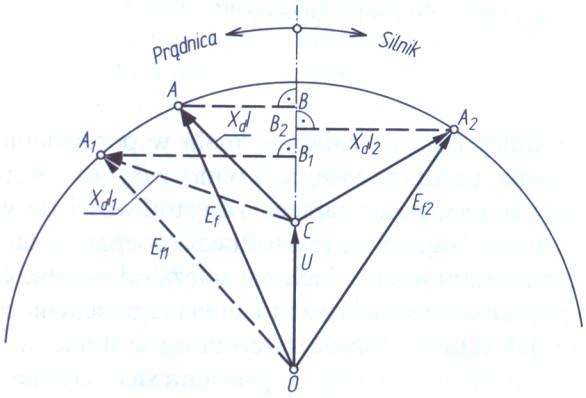
W przypadku prądnicy pracującej na sieć sztywną na stan jej pracy można wpłynąć przez:

- zmianę prądu wzbudzenia,
- zmianę momentu napędowego (przy pracy prądnicowej) lub momentu obciążenia (przy pracy silnikowej).

Zwykle wpływ zmian prądu wzbudzenia i zmian momentu napędowego (lub obciążenia) na właściwości maszyny rozpatruje się oddzielnie, zakładając jedną z wielkości jako stałą.

Wpływ zmian prądu wzbudzenia przy U = const, f = const i P = const omówiono w punkcie 7.3.8. Z analizy tej wynika, że zmiana prądu wzbudzenia prądnicy pracującej na sieć sztywną powoduje jedynie zmianę składowej biernej prądu twornika, a zatem zmianę współczynnika mocy. Aby określić wpływ zmian momentu napędowego (mocy) na pracę prądnicy pracującej na sieć sztywną (U = const, f = const) przy stałym prądzie wzbudzenia (I_f = const), przeanalizujemy przedstawiony na **rysunku 7.31** wykres wektorowy dla maszyny pracującej w takich warunkach. W praktyce tego rodzaju warunki istnieją wówczas, gdy prądnica synchroniczna jest przyłączona do sieci sztywnej i gdy przy stałym prądzie wzbudzenia reguluje się moc turbiny napędzającej. W przypadku silnika synchronicznego warunki takie występują przy zmianie momentu napędowego, jeżeli silnik jest zasilany z sieci o stałym napięciu i jeżeli nie reguluje się przy tym prądu wzbudzenia.

W maszynie nienasyconej $E_f = cI_f$, dlatego przy I_f = const wektor E_f zakreśla okrąg o promieniu E_f (rys. 7.31), a wektor U jest stały. Przy zmianach prądu wzbudzenia I_f, promień tego okręgu też się zmienia — im większy jest prąd I_f tym większy jest promień okręgu. Ze zmianą mocy czynnej (na wykresie mocy czynnej odpowiada odcinek AB), np. przejście od punktu A do punktu A_1 wiąże się w tych warunkach ze zmianą mocy biernej (na wykresie mocy biernej odpowiada odcinek BC). Przykładowo przejście od punktu A do A_1 spowoduje, że moc bierna zmieni się z BC na $B_1C \neq BC$. Tak więc zmiana mocy czynnej przy U = const oraz I_f = const powoduje zmianę zarówno rozpływu mocy czynnej, jak i biernej. Wykres przedstawiony na rysunku 7.31 odpowiada pominięciu rezystancji w obwodzie twornika (R = 0). Po uwzględnieniu tej rezystancji wykres wektorowy ulegnie zmianie.



Rys. 7.31. Praca maszyny przy U = const, I_f = const, P = var

Po analizie zachowania się prądnicy pracującej na sieć sztywną można wyciągnąć następujące wnioski:

- **aby zmienić moc czynną wydawaną do układu, należy regulować moc maszyny napędzającej (np. przez regulację ilości pary lub wody dopływającej do turbiny);**
- **aby zmienić moc bierną wydawaną przez prądnicę do układu należy regulować prąd wzbudzenia.**

Praca indywidualna

Jeżeli moc rozpatrywanej prądnicy P_{Np} jest dużo większa od łącznej mocy pozostałych prądnic ($P_{Np} >> P_{Ns}$), **to pracę tej prądnicy można uznać praktycznie za indywidualną**. W takich warunkach wartości napięcia i częstotliwości układu zależą od rozpatrywanej prądnicy.

Aby otrzymać możliwie stałą prędkość obrotową, a więc i stałą częstotliwość napięcia prądnicy, wyposaża się ją w regulator prędkości. Jeżeli maszyna napędzająca prądnicę pracującą indywidualnie jest wyposażona w regulator prędkości, utrzymujący praktycznie stałą prędkość obrotową, to zmianom obciążenia w sieci odpowiadają zmiany napięcia określone charakterystykami zewnętrznymi prądnicy (rys. 7.20). Aby przy zmianie obciążenia utrzymać w tych warunkach stałe napięcie, należałoby — jak wskazują charakterystyki regulacyjne (rys. 7.23) — regulować prąd wzbudzenia. Do takiej regulacji prądu wzbudzenia z reguły są stosowane automatyczne regulatory napięcia.

Ogólnie należy stwierdzić, że regulacja mocy maszyny napędzającej oraz prądu wzbudzenia prądnicy pracującej indywidualnie wpływa na zmianę parametrów ($U, f, I, \cos\varphi$) energii wydawanej do sieci.

Praca na sieć elastyczną

Jeżeli moc znamionowa dwóch prądnic jest w przybliżeniu taka sama $P_{Ns} \approx P_{Np}$, to obie maszyny mają równorzędny wpływ na napięcie i częstotliwość w układzie.

Praca na sieć elastyczną występuje w praktyce bardzo rzadko, jednak warto ogólnie poznać skutki regulacji prądu wzbudzenia lub mocy na wale napędowym. Jeżeli prądnice pracują przy stałej prędkości obrotowej (są wyposażone w regulatory prędkości), to zmiana mocy maszyny napędzającej powoduje zmianę częstotliwości w układzie i zmianę rozpływu mocy czynnej. Zmiana prądu wzbudzenia jednej z prądnic (w przypadku, gdy prądnice są wyposażone w regulatory napięcia) prowadzi do zmiany napięcia i rozpływu mocy biernej.

W praktyce praca równoległa prądnicy synchronicznej nie jest nigdy w ścisłym tego słowna znaczeniu ani pracą na sieć sztywną, ani pracą indywidualną — wykazuje ona zawsze pewne cechy pośrednie, przy czym najczęściej są one zbliżone do pracy na sieć sztywną.