

9. ŁĄCZNIKI STATYCZNE PRĄDU PRZEMIENNEGO

9.1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i podstawowymi właściwościami jednofazowych łączników statycznych prądu przemiennego oraz z możliwościami wykorzystania tych układów do sterowania parametrami energii elektrycznej pobieranej przez odbiornik.

W zakres ćwiczenia wchodzi:

- a) zapoznanie się z zasadą pracy łącznika dla różnych rodzajów sterowania (fazowe, kluczowe, impulsowe),
- b) badanie układu sterowanego fazowego przy zasilaniu odbiornika o charakterze rezystancyjnym, rezystancyjno-indukcyjnym oraz indukcyjnym.

9.2. Wiadomości podstawowe

9.2.1. Informacje wstępne [9.1, 9.2]

Łączniki statyczne to aparaty, w których funkcję przerywania obwodu pełni jeden lub więcej sterowalnych elementów elektronicznych, najczęściej tyrystorów lub tranzystorów mocy. W praktyce w większości rozwiązań stosuje się układy tyrystorowe lub tyrystorowo-diodowe. Łączniki statyczne cechują się istotnymi zaletami w stosunku do łączników mechanizmowych, z których najważniejsze, to:

- c) bezłukowe przerwanie obwodu,
- d) praktycznie nieograniczona trwałość łączeniowa (brak zużywających się ruchomych części mechanicznych),
- e) duża, praktycznie nieograniczona częstość łączeń,
- f) możliwość sterowania parametrami energii elektrycznej pobieranej przez zasilany odbiornik,
- g) dowolna pozycja pracy,
- h) cicha praca

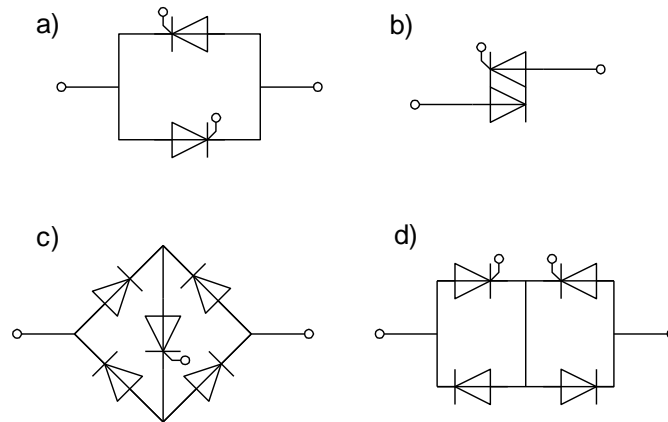
Do najważniejszych wad łączników statycznych w porównaniu z łącznikami mechanizmowymi należy zaliczyć:

- a) duże straty energii,
- b) brak galwanicznej przerwy pomiędzy źródłem i odbiornikiem w stanie wyłączenia,
- c) niewielka odporność na zwarcia, przeciążenia i przepięcia łączeniowe,
- d) możliwość przypadkowego załączenia wskutek występowania zakłóceń i przepięć,
- e) brak styków pomocniczych.

Ze względu na możliwość sterowania parametrami energii elektrycznej, funkcję komutacji obwodu w łącznikach statycznych wiąże się zwykle z funkcją sterowania napięciem, prądem i mocą zasilanego odbiornika.

Obwody główne łączników statycznych w układach prądu przemiennego tworzą różnego rodzaju konfiguracje tyrystorów bądź tranzystorów oraz diod, w celu umożliwienia dwukierunkowego przepływu prądu. Najbardziej znane rozwiązania układów tyrystorowych i tyrystorowo-diodowych przedstawiono na rys. 9.1. Wszystkie one cechują się określonymi zaletami i wadami. Najprostszym rozwiązaniem jest odwrotnie równoległy układ tyrystorów (rys. 9.1 a). Zaletą tyrystora symetrycznego (triaka) (rys. 9.1 b) w stosunku do układu odwrotnie równoległego jest prostszy, pojedynczy układ wyzwolenia, lecz wadą są gorsze parametry dynamiczne. Zaletą układu mostkowego (rys. 9.1 c) jest zastosowanie tylko jednego tyrystora. Wadą tego rozwiązania jest jednak znaczny spadek napięcia w kierunku

przewodzenia na trzech szeregowo połączonych elementach (tyrystor i dwie diody), co powoduje zwiększone straty mocy i w praktyce ogranicza moc odbiornika zasilanego tym układem do ok. 1 kW. Układ z rys. 9.1 d, w którym każdy z tyrystorów jest zbocznikowany diodą, jest preferowany do zastosowania w obwodach o znacznych spodziewanych wartościach napięć.



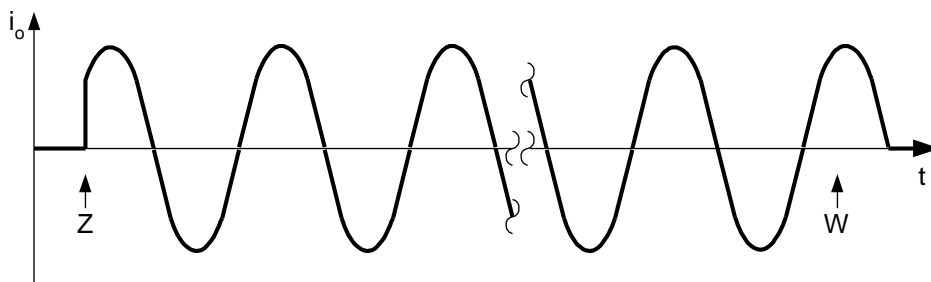
Rys. 9.1. Podstawowe układy połączeń obwodów głównych jednofazowych łączników (sterowników) statycznych tyrystorowych i tyrystorowo-diodowych prądu przemiennego:
 a) układ odwrotnie równoległy tyrystorów, b) tyrystor symetryczny (triac),
 c) układ mostkowy, d) układ odwrotnie równoległy tyrystorowo-diodowy.

9.2.2. Rodzaje sterowania stosowane w łącznikach statycznych

Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje sterowania stosowane w łącznikach statycznych:

- a) kluczowe,
- b) impulsowe,
- c) fazowe.

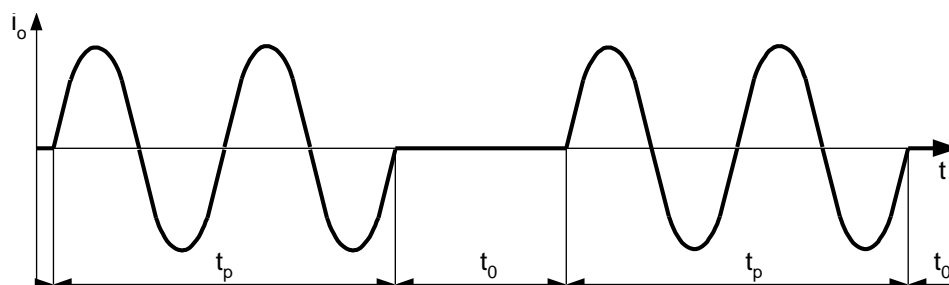
Sterowanie kluczowe polega na ciągłym, pełnym (tj. przy przewodzeniu całego sinusoidalnego przebiegu prądu)ysterowaniu łącznika statycznego w stanie przewodzenia oraz na braku ysterowania w stanie otwarcia łącznika (rys. 9.2). Nie wykorzystuje się tu możliwości sterowania energią odbiornika, a łącznik pełni w obwodzie jedynie funkcję rozłącznika.



Rys. 9.2. Ilustracja przebiegów prądu podczas sterowania kluczowego odbiornika rezystancyjnego:
 i_o – prąd odbiornika, Z, W – impulsy odpowiednio: załączenia i wyłączenia tyrystora w sterowaniu kluczowym.

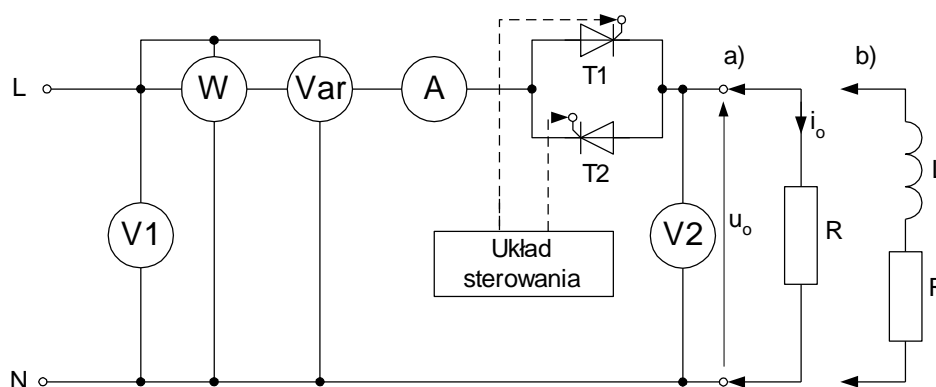
Sterowanie impulsowe polega na cyklicznym przepływie określonej liczby pełnych okresów prądu sinusoidalnego w czasie cyklu pracy t_p , po czym następuje cykl przerwy t_0 , trwający również określoną liczbę pełnych okresów prądu (rys. 9.3). Suma czasów t_p oraz t_0 jest stała i nazywana jest okresem impulsowania T . Iloraz t_p/T nazywa się współczynnikiem wypełnienia. Sterowanie impulsowe, ze względu na „pulsujący” charakter prądu nadaje się do

zasilania takich odbiorników, w których stała czasowa sterowanego procesu jest co najmniej kilkukrotnie dłuższa od okresu T . Typowym przykładem zastosowania tego rodzaju sterowania jest grzejnictwo elektryczne. Zaletą sterowania impulsowego w porównaniu ze sterowaniem fazowym jest brak generacji wyższych harmonicznych prądu i związanej z tym mocy deformacji. Wadą tego sterowania jest natomiast „pulsujący” charakter obciążenia sieci, co w przypadku niedostatecznej mocy zwarciowej układu zasilania może być przyczyną znacznych wahań napięcia, zjawiska migotania światła i generacji subharmonicznych w prądzie obciążenia.



Rys. 9.3. Ilustracja przebiegów prądu podczas sterowania impulsowego odbiornika rezystancyjnego: i_o – prąd odbiornika, t_p , t_0 – odpowiednio: czas pracy i czas przerwy w sterowaniu impulsowym.

Sterowanie fazowe jest najbardziej rozpowszechnionym sposobem sterowania łączników tyrystorowych i polega naysterowaniu tyrystora impulsem przesuniętym o tzw. kąt wysterowania α w stosunku do miejsca zerowego sinusoidy napięcia zasilającego, poprzedzającego chwilę załączenia. Impuls załączający jest generowany w każdej kolejnej półfali napięcia zasilającego, a jego przerwanie oznacza wyłączenie odbiornika podczas najbliższego przejścia prądu przez zero. Ze względu na różnice w przebiegach napięcia i prądu oraz w zakresie możliwych zmian kąta wysterowania α w sterowaniu fazowym rozróżnia się dwa zasadnicze rodzaje obwodów odbiorczych: rezystancyjny i rezystancyjno-indukcyjny. Przebiegi napięcia i prądu przy sterowaniu fazowym w obwodach jednofazowych prądu przemiennego są badane w układzie jak na rys. 9.4.



Rys. 9.4. Łącznik tyrystorowy w układzie odwrotnie równoległym zasilający odbiornik rezystancyjny (a) i rezystancyjno-indukcyjny (b).

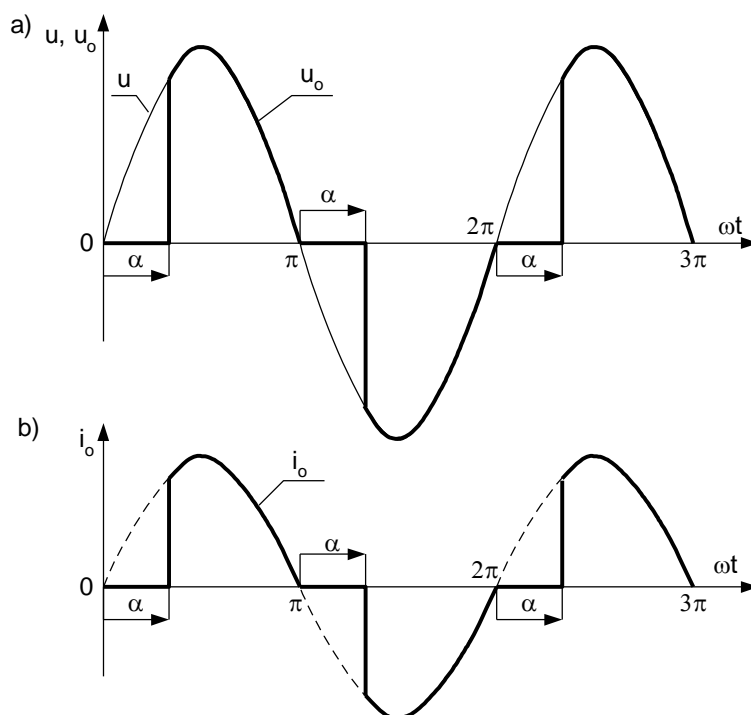
W odbiorniku o charakterze rezystancyjnym przebieg prądu płynącego przez odbiornik $i_o = f(\omega t)$ jest w fazie z przebiegiem napięcia na odbiorniku $u_o = f(\omega t)$ (rys. 9.5), a ich kształt jest fragmentem dodatnich i ujemnych połówek sinusoidy obciętych przy kącie wysterowania α . W chwili załączenia tyrystora (kąt α) prąd skokowo przyjmuje wartość odpowiadającą niesterowanemu przebiegowi sinusoidalnemu (rys. 9.5). Zakres zmian kąta wysterowania α zawiera się w przedziale $0 \leq \alpha \leq \pi$.

Przy pominięciu spadku napięcia na przewodzących tyrystorach łącznika, wartości skuteczne napięcia na odbiorniku U_o i prądu odbiornika I_o wyrażają następujące zależności:

$$U_o = \sqrt{\left(\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U \sin \omega t\right)^2 d\omega t} = U \sqrt{\frac{A(\alpha)}{\pi}}, \quad (9.1)$$

gdzie: U – wartość skuteczna napięcia zasilającego, $A(\alpha) = \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha$,

$$I_o = \frac{U_o}{R_o} = \frac{U}{R_o} \sqrt{\frac{A(\alpha)}{\pi}}, \quad (9.2)$$



Rys. 9.5. Przebiegi napięcia u_o (a) i prądu i_o (b) odbiornika rezystancyjnego przy sterowaniu fazowym: u – napięcie zasilające, α – kąt wysterowani tyrystorów łącznika.

Przebieg prądu odbiornika $i_o = f(\omega t)$ jest przebiegiem odkształconym. Przy założeniu, że napięcie $u = U \sin \omega t$ zasilające układ (rys. 9.4), mierzone na woltomierzu V1 (rys. 9.4), jest napięciem nieodkształconym, czyli jest zgodne z przebiegiem pierwszej harmonicznej napięcia:

$$U = U_1, \quad (9.3)$$

watomierz W (rys. 9.4) mierzy moc czynną pierwszej harmonicznej, zgodnie z zależnością:

$$P_o = U I_{o1} \cos \varphi_1, \quad (9.4)$$

gdzie: I_{o1} – wartość skuteczna pierwszej harmonicznej prądu odbiornika,
 φ_1 – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem zasilającym (9.3), a pierwszą harmoniczną prądu I_{o1} .

Kąt przesunięcia fazowego φ_1 jest skutkiem odkształcenia przebiegu prądu i_o od przebiegu sinusoidalnego. Ponieważ przebieg i_o (rys. 9.5) jest okresowo zmienny, można dokonać jego rozkładu na składowe harmoniczne, przy czym pierwsza harmoniczna i_{o1} będzie przesunięta w fazie o kąt φ_1 względem napięcia zasilającego, które zgodnie z założeniem (9.3) jest napięciem nieodkształconym. Kąt φ_1 jest przy tym zależny od kąta α . Dla $\alpha = 0$, kąt $\varphi_1 = 0$, lecz dla $\alpha > 0$ kąt $\varphi_1 \neq 0$. Wynika stąd, że i waromierz Var (rys. 9.4) będzie realizował swój pomiar zgodnie z zależnością:

$$D_o = UI_{o1} \sin \varphi_1, \quad (9.5)$$

gdzie D_o jest mocą deformacji dla pierwszej harmonicznej prądu.

Na przykładzie odbiornika rezystancyjnego widać tu, że waromierz, bądź licznik mocy biernej, dokonuje pomiaru wielkości, która nie może być mocą bierną (odbiornik rezystancyjny), lecz jest mocą wynikającą z odkształcenia przebiegów. Moc tę nazywa się mocą deformacji lub odkształcenia [9.1, 9.2]. Należy również zwrócić uwagę na to, że przy odkształconych przebiegach prądu czym innym jest współczynnik mocy:

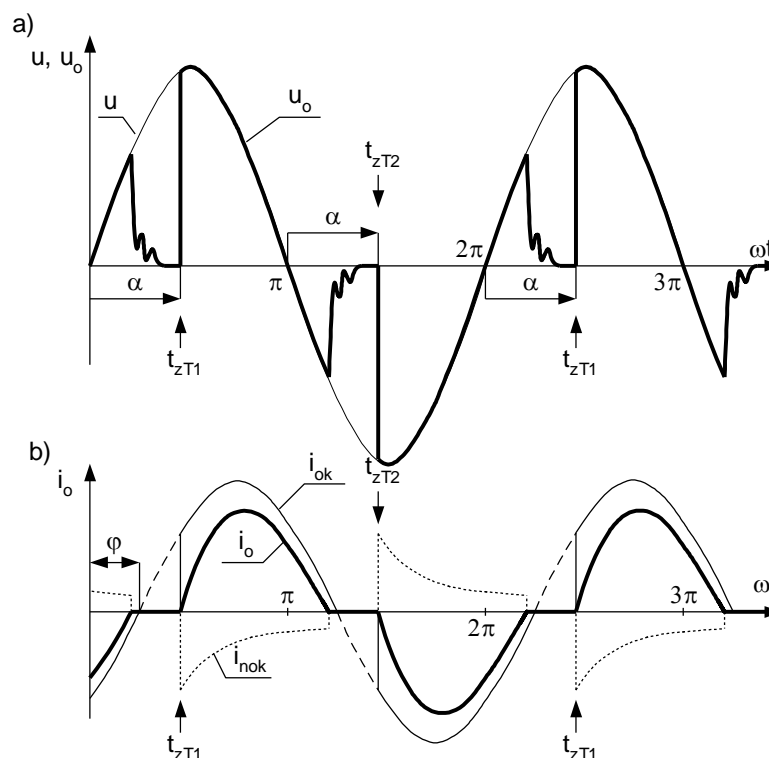
$$\lambda = \frac{P_o}{S} = \frac{UI_{o1} \cos \varphi_1}{UI_o}, \quad (9.6)$$

a czym innym $\cos \varphi_1$. Wyrażenie $\cos \varphi$, bez określenia do której harmonicznej prądu i napięcia się odnosi, jest pozbawione sensu fizycznego w przebiegach odkształconych.

Przebiegi prądu $i_o = f(\omega t)$ i napięcia odbiornika $u_o = f(\omega t)$ przy sterowaniu fazowym odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym przedstawiono na rys. 9.6. W chwili załączenia tyrystorów (t_{zT1} , t_{zT2} , rys. 9.6) napięcie na odbiorniku u_o przyjmuje skokowo wartość wynikającą z sinusoidalnego przebiegu napięcia zasilającego, podczas gdy prąd i_o , ze względu na zachowawczy charakter indukcyjności odbiornika, narasta od zera, zgodnie z krzywą wynikającą z prawa komutacji dla obwodu indukcyjnego. Przebieg prądu i_o można przedstawić jako superpozycję przebiegu sinusoidalnego dla pełnegoysterowania odbiornika ($\alpha = 0$) i składowej aperiodycznej o stałej czasowej zaniku:

$$T = \frac{R}{L}, \quad (9.7)$$

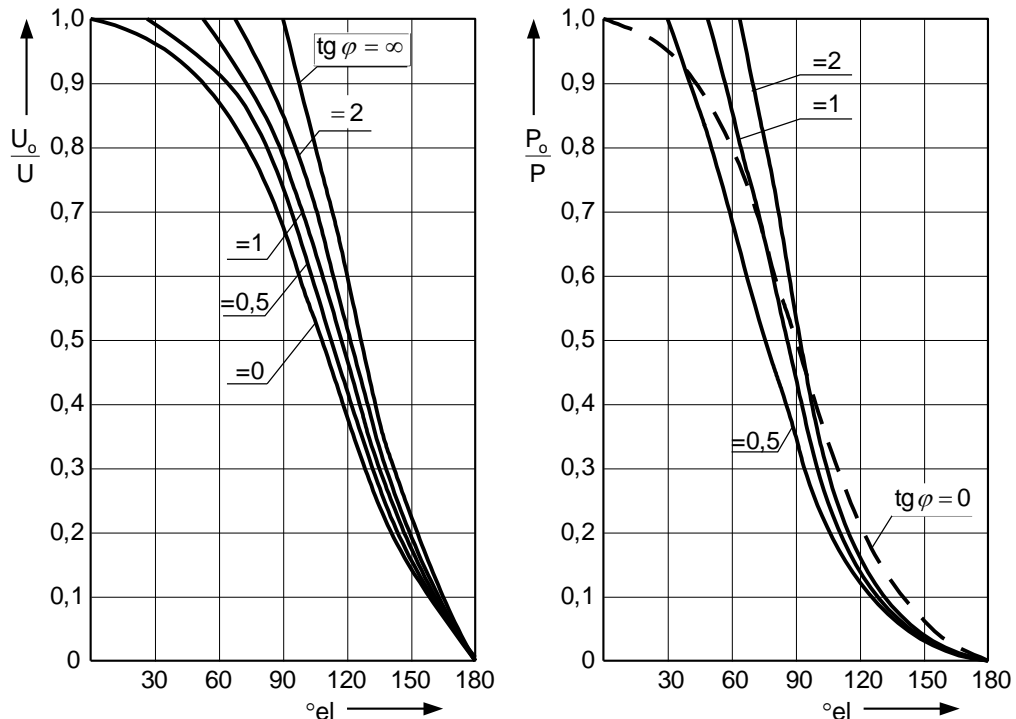
Należy zauważyć, że kąt ysterowania α jest możliwy do odczytania jedynie z przebiegu napięcia $u_o = f(\omega t)$ (rys. 9.6). Miejsce zerowe prądu w chwili wyłączenia tyrystora jest zależne od stałej czasowej (9.7) i nie może być punktem odniesienia do określenia kąta ysterowania α .



Rys. 9.6. Przebiegi napięcia u_o (a) i prądu i_o (b) odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego przy sterowaniu fazowym: i_{ok} , - składowa okresowa prądu odbiornika, i_{nok} - składowa nieokresowa prądu odbiornika, t_{zT1} , t_{zT2} - chwila załączenia odpowiednio tyrystorów T1 i T2 (rys. 9.4), pozostałe oznaczenia jak na rys. 9.5.

W przebiegach napięcia $u_o = f(\omega t)$ (rys. 9.6) i prądu odbiornika $i_o = f(\omega t)$ wyróżnia się przedziały czasu, w których iloczyn chwilowych wartości $u_o \cdot i_o$ jest dodatni bądź ujemny. Przedział czasu, w którym $u_o \cdot i_o > 0$, to zakres poboru energii z sieci zasilającej, natomiast $u_o \cdot i_o < 0$, to zakres oddawania energii z odbiornika do sieci. Dla idealnej indukcyjności ($R = 0$) wartości obydwu tych energii są sobie równe.

Sterowanie napięciem, prądem i mocą odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego odbywa się w zakresie $\varphi \leq \alpha \leq \pi$. Kąt α nie może być mniejszy od kąta przesunięcia fazowego φ przy pełnymysterowaniu, gdyż nie jest możliweysterowanie tyrystora dla $\alpha < \varphi$, ponieważ jego prąd musiałby wówczas płynąć w kierunku zaporowym. Zakresy zmian kąta α dla różnych kątów φ widoczne są na rys. 9.7.



Rys. 9.7. Charakterystyki względnych zmian wartości skutecznej napięcia U_o i mocy czynnej P_o odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego w funkcji kąta wysterowania tyrystorów α ; U, P, φ - odpowiednio: napięcie, moc czynna i kąt przesunięcia fazowego przy zasilaniu odbiornika znamionowym napięciem sinusoidalnym

Odbiornik rezystancyjno-indukcyjny (rys. 9.4) pobiera z sieci moc czynną, mierzona przez watomierz W (rys. 9.4) zgodnie z zależnością (9.4), oraz moc bierną i moc deformacji, mierzone sumarycznie przez waromierz Var , zgodnie z zależnością :

$$\sqrt{Q_o^2 + D_o^2} = UI_{o1} \sin \varphi_1, \quad (9.8)$$

gdzie Q_o jest mocą bierną odbiornika. Kąt przesunięcia fazowego φ_1 w odbiorniku rezystancyjno-indukcyjnym wynika zarówno z poboru mocy biernej Q_o , jak i z odkształcenia prądu. Współczynnik mocy λ wyznacza się z zależności (9.6), przy czym moc pozorna jest w tym przypadku równa sumie geometrycznej mocy czynnej, biernej i pozornej odbiornika:

$$S_o = \sqrt{P_o^2 + Q_o^2 + D_o^2}. \quad (9.9)$$

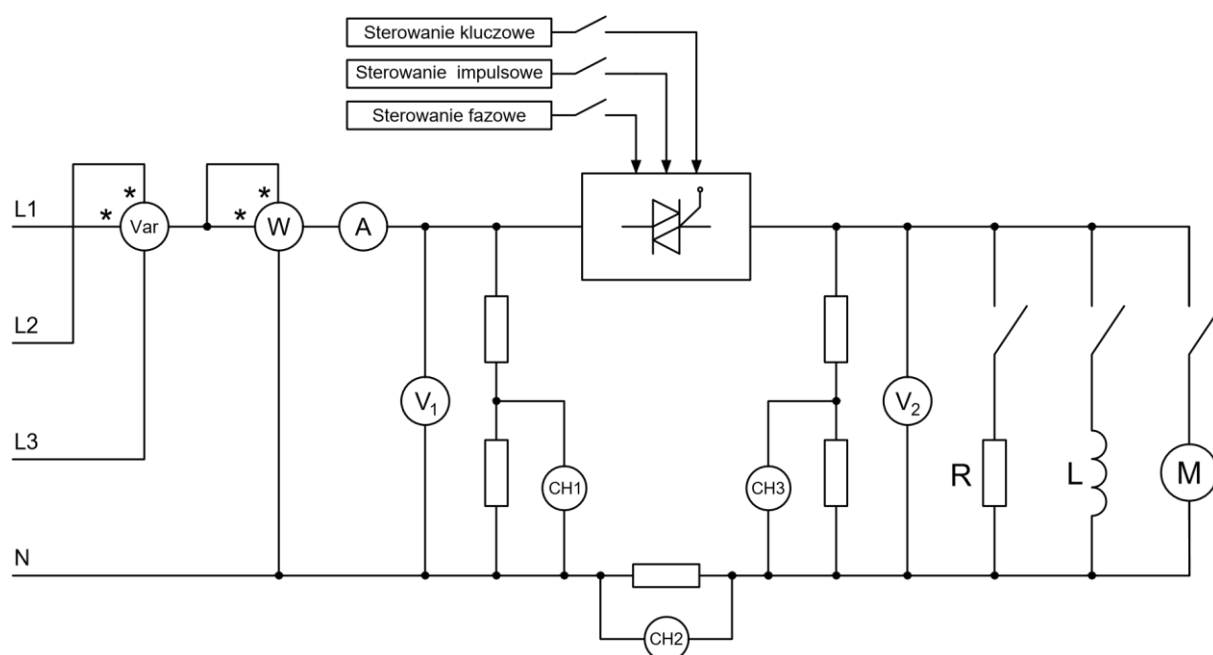
9.3. Niezbędne przygotowanie studenta

Studentów obowiązuje znajomość materiału dotyczącego jednofazowych łączników i sterowników statycznych prądu przemiennego zawartego w pozycjach [9.1 i 9.2].

9.4. Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne (rys. 9.8) jest wyposażone w układ jednofazowego łącznika statycznego prądu przemiennego, który może pracować w trzech rodzajach sterowania: fazowego, impulsowego i kluczowego. Łącznik zbudowany jest w oparciu o tyrystor symetryczny (triac) (rys. 9.1). Układ jest zasilony z sieci trójfazowej, przy czym fazy L2 oraz L3 wykorzystane są tylko w celu umożliwiania pomiaru mocy biernej. Faza L1 przyłączona jest za pośrednictwem transformatora separacyjnego, dzięki czemu można m.in. dokonywać bezpośredniej, tj. bez separacji galwanicznej, obserwacji przebiegów napięcia $u_o = f(\omega t)$ i prądu odbiornika $i_o = f(\omega t)$ na oscyloskopie. Włączone do obwodu przyrządy (rys. 9.8) pozwalają na pomiar napięcia zasilającego (woltomierz V_1), mocy czynnej (watomierz W), mocy biernej (waromierz Var), prądu (amperomierz A) oraz napięcia na zaciskach odbiornika (woltomierz V_2) w funkcji zmian wielkości sterujących. Stanowisko umożliwia badanie odbiorników o charakterze rezystancyjnym, rezystancyjno-indukcyjnym oraz indukcyjnym. Dodatkowo możliwe jest badanie łącznika przy obciążeniu w postaci silnika komutatorowego prądu przemiennego.

Stanowisko laboratoryjne jest ustawione po załączeniu domyślnie w tryb sterowania kluczowego. Zmiana trybu pracy możliwa jest dzięki przyciskom monostabilnym znajdujących się w centralnej części układu. W trybie pracy impulsowej, za pomocą enkodera obrotowego znajdującego się po prawej stronie wyświetlacza LCD, możliwy jest wybór wartości okresu impulsowania, a po naciśnięciu wartości współczynnika wypełnienia. W trybie sterowania fazowego enkoderem zmienia się wartość kąta wyzwolenia triaka.



Rys. 9.8. Schemat układu laboratoryjnego do badania jednofazowego łącznika statycznego prądu przemiennego.

9.5. Program ćwiczenia

Realizacja ćwiczenia obejmuje trzy następujące punkty.

1. Sterowanie kluczowe. Dokonać obserwacji sterowania kluczowego, przełączając łącznik w pozycję załącz/wyłącz.
2. Sterowanie impulsowe. Należy dokonać obserwacji pracy odbiornika rezystancyjnego przy sterowaniu impulsowym, zmieniając okres impulsowania oraz współczynnik wypełnienia w całym zakresie możliwości regulacyjnych sterownika, tj. od zera (odbiornik wyłączony) do 100% (przewodzenie ciągłe). Zaobserwować przebiegi prądu odbiornika na oscyloskopie i zarejestrować przykładowe z nich. Zwrócić uwagę na wskazania waromierza Var (rys. 9.8) w całym zakresie sterowania impulsowego. Zarejestrować przykładowe przebiegi prądu i napięcia z ekranu oscyloskopu.
3. Sterowanie fazowe. Należy dokonać sterowania napięciem $U_o = f(\alpha)$, prądem $I_o = f(\alpha)$, mocą czynną $P_o = f(\alpha)$ oraz dokonać odczytu wskazań waromierza Var (rys. 9.8) w funkcji zmian kąta α dla obciążenia o charakterze:
 - rezystancyjnym,
 - rezystancyjno-indukcyjnym,
 - indukcyjnym, dla wskazanych przez prowadzącego odbiorników.

Zarejestrować przykładowe przebiegi prądu i napięcia z ekranu oscyloskopu.

9.6. Opracowanie wyników badań

1. Wyniki pomiarów uzyskane w badaniu sterowania fazowego należy zestawić w tabelach, oraz:
 - obliczyć wartość współczynnika mocy λ (9.6) i φ (9.4, 9.5, 9.8), przy założeniu (9.3); wyniki zestawić w jednej tabeli wraz z rezultatami pomiarów,
 - wykreślić funkcje: sterowania mocą $P_o/P = f(\alpha)$ oraz napięcia $U_o/U = f(\alpha)$ odbiornika, na wzór wykresów z rys. 9.7.
2. W oparciu o wykonane pomiary i obserwacje dokonać porównania zalet i wad sterowania fazowego i impulsowego, zwracając szczególną uwagę na:
 - płynność, dokładność i zakres starowania,
 - oddziaływanie przekształtnika na sieć zasilającą (odkształcenie przebiegów, wahania napięcia zasilającego).
3. Dokonać podsumowania i wyciągnąć wnioski wynikające z przeprowadzonych pomiarów.

9.7. Literatura

- [9.1] Barlik R., Nowak M.: Technika tyrystorowa, WNT, Warszawa 1997.
- [9.2] Markiewicz H.: Aparaty elektryczne, PWN, Warszawa, 1989.
- [9.3] Kurowski P.: Projekt stanowiska laboratoryjnego do badania łącznika statycznego prądu przemiennego, 2018.