

**Beata ANTOSIEWICZ
Piotr BICZEL**

Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki

Symulacja pracy hybrydowej linii elektroenergetycznej

Streszczenie. *Artykuł przedstawia koncepcję hybrydowego systemu przesyłu energii elektrycznej. Autorzy omówili skrótowo właściwości układy hybrydowego i zmianę ilości przesyłanej energii w porównaniu do systemu przemiennoprądowego. Przedstawiono model symulacyjny układu, obrazujący podstawowe właściwości. Zasygnalizowano podstawowe problemy aplikacyjne.*

Słowa kluczowe: prąd stały, przesył energii, linie kablowe, generacja rozproszona

Wprowadzenie

Kierunek rozwoju współczesnych systemów elektroenergetycznych nieuchronnie zmierza do rozproszenia wytwarzania energii i zwiększenia autonomii podmiotów, uczestniczących w tym systemie. Coraz więcej źródeł energii będzie instalowane w sieciach rozdzielczych, pojawią się przepływy dwukierunkowe i konieczność regulacji przepływu energii.

Z drugiej strony dynamika rozwoju gospodarczego kraju oraz wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną przy jednoczesnym roszczeniowym podejściu obywateli do kwestii prowadzenia linii elektroenergetycznych utrudnia prowadzenie inwestycji sieciowych.

Potrzebne jest zatem rozwiązanie, które pozwoli na zwiększenie przepustowości istniejących linii. Problem jest szczególnie istotny, gdy eksploatowana linia jest przeciążona w niewielkim stopniu i potrzeba byłoby w tani sposób zwiększyć jej możliwości przesyłowe bez konieczności wymiany przewodów i zmian w konstrukcji linii. Dotyczy to szczególnie kablowych linii rozdzielczych w miastach, które to zagadnienie jest tu przedmiotem rozważań.

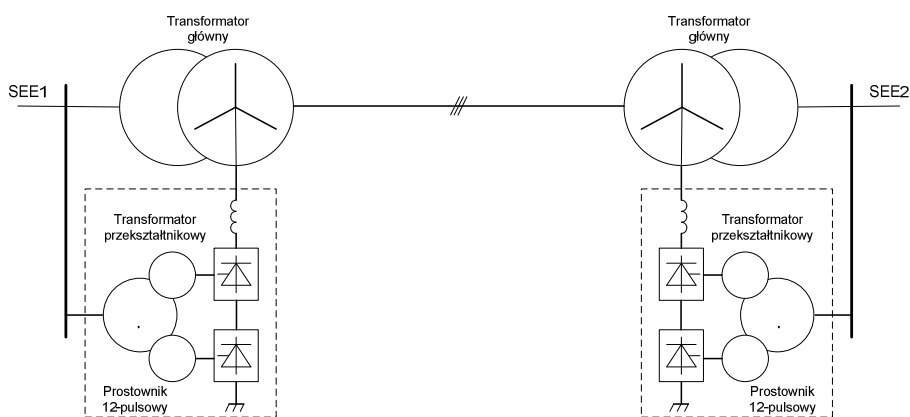
Rozwiązaniem problemu może być zastosowanie przesyłu liniami hybrydowymi – jednocześnie prądem przemienny i stałym. Koncepcja takiego rozwiązania nie jest nowa [3]. Jednak obecna technika energoelektroniczna oraz sterowania umożliwia wykonanie niezawodnych urządzeń za akceptowalną cenę. Stąd zainteresowanie autorów tym zagadnieniem. Należy rozważyć jakie zagrożenia i możliwości daje proponowane rozwiązanie w świetle współczesnej wiedzy, technologii i gospodarki.

Hybrydowy układ przesyłu

Schemat hybrydowego układu przesyłu energii elektrycznej jest przedstawiony na rys. 1. Koncepcja tego rozwiązania została w polskiej literaturze przedstawiona przez Popczyka [4] za pracą [3].

Układ ten działa w ten sposób, że do składowej przemiennej dodana jest składowa stała napięcia na początku linii, a następnie jest ona usuwana na końcu. Składową stałą można dodać włączając przekształtnik tyrystorowy pomiędzy punkt zerowy transformatora głównego a uziemienie. W stacji, z której energia będzie wypływać,

przekształtnik tyrystorowy pracuje w reżimie prostownikowym, a w stacji, do której energia wpływa, w reżimie pracy falownikowej. Przewodem powrotnym dla prądu stałego jest ziemia.



Rys. 1. Schemat hybrydowego układu przesyłu energii elektrycznej

Energia w tym układzie jest przenoszona zarówno przez składową przemienną, jak i składową stałą. Składowa przemienna będzie przenosić również moc bierną, wynikającą z różnicy napięć po obu stronach linii, oraz moc odkształcenia. Część przemiennoprądowa zachowuje zdolność samoregulacji, część stałoprądowa wymaga sterowania.

Na bilans mocy biernej i odkształcenia duży wpływ mają przekształtniki. Układy tyrystorowe generując moc bierną w funkcji kąta opóźnienia załączenia tyrystorów [1]. Jest ona najmniejsza, gdy układ pracuje z zerowym kątem opóźnienia, czyli gdy składowa stała jest największa, na jaką pozwala konstrukcja przekształtników. Stąd konieczność starannego doboru wielkości składowej stałej.

Przekształtniki wprowadzają do układu również moc odkształcenia i to nawet wtedy, gdy napięcia i prądy w systemach po obu stronach układu są sinusoidalnej. Odkształcenia są wprowadzane po stronie prądu przemiennego, ze względu na odkształcenie prądów przekształtników, oraz po stronie prądu stałego, ze względu na pulsacje napięcia składowej stałej. Z tych powodów należy stosować przekształtniki wielopulsowe [2].

Układ może przenosić energię również wyłącznie składową przemienną lub wyłącznie składową stałą. Dzięki temu, przy ograniczeniu mocy przenoszonej, ma większą niezawodność, niż układ prądu stałego lub przemiennego.

Moc w układzie hybrydowym

Energia jest wtedy przenoszona zarówno przez składową przemienną, jak i stałą. Moc pozorną przenoszona przez układ jest opisana wzorem (1), a moc czynna wzorem (2).

$$(1) \quad S_h = U_h I_h = \sqrt{U_0^2 + U_1^2} \sqrt{I_0^2 + I_1^2}$$

$$(2) \quad P_h = 3U_1 I_1 \cos(\varphi) + 3U_0 I_0$$

gdzie: U_h , I_h – wartości skuteczne napięcia i prądu fazowego w układzie hybrydowym, U_p , I_p – wartości skuteczne napięcia i prądu fazowego w układzie przemiennoprądowym,

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

U_1, I_1 – wartości skuteczne napięcia i prądu częstotliwości podstawowej w układzie hybrydowym, U_0, I_0 – wartości składowej stałej napięcia i prądu fazowego w układzie hybrydowym, φ – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem o częstotliwości podstawowej.

Zwiększenie przenoszonej mocy czynnej zależy więc od wielkości dodanej składowej stałej. Składowa stała może być dodana w ograniczonym zakresie ze względu na:

- ograniczenie dopuszczalnej wartości skutecznej napięcia, składowej stałej i przemiennej ze względu na konstrukcję linii,
- ograniczenie dopuszczalnej wartości skutecznej prądu ze względu na straty czynne w przewodach.

Zwiększenie przepustowości linii oznacza zwiększenie mocy czynnej, którą może przenieść dana linia w stosunku do przepustowości przed hybrydyzacją. Zwiększenie to można wyrazić jako (3).

$$(3) \quad k = \frac{P_h}{P_p}$$

Przy czym w rozważanym przypadku linii kablowej, zwiększenie to może się odbyć wyłącznie przez zwiększenie wartości skutecznej napięcia i pozostawienie strat czynnych na tym samym poziomie. Warunki te mogą być przedstawione jako (4).

$$(4) \quad \begin{aligned} \Delta P_h &= \Delta P_p \Rightarrow I_h = I_p \\ U_h &> U_p, U_1 &= U_p \end{aligned}$$

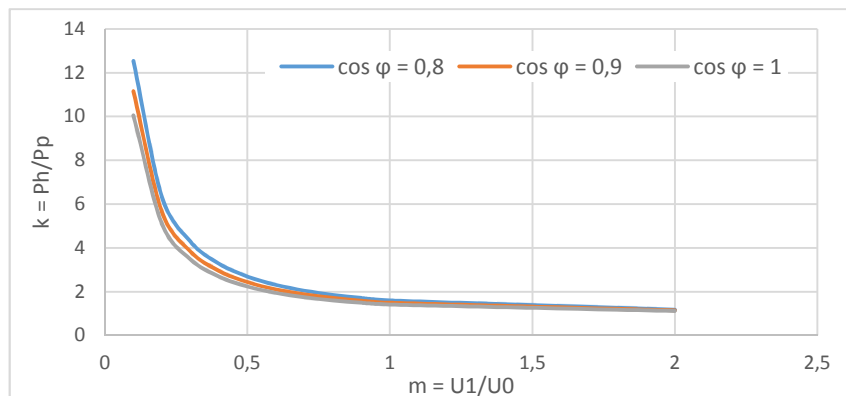
gdzie: $\Delta P_h, \Delta P_p$ – straty mocy czynnej w przewodach odpowiednio dla systemu hybrydowego i przemiennoprądowego.

Oznaczając $m = \frac{U_1}{U_0}$ można wyznaczyć zwiększenie moc k jako funkcję m oraz

$\cos\varphi$, które dla warunków (4) wynosi (5) [4].

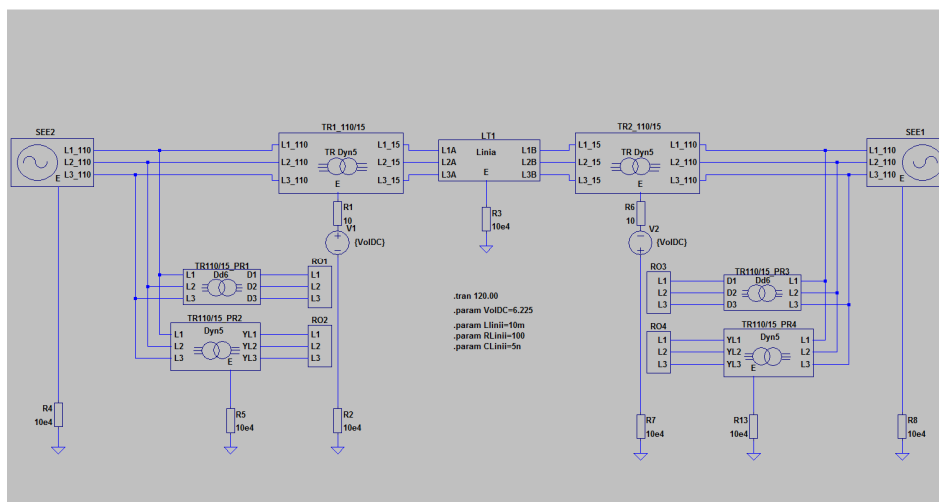
$$(5) \quad k = \frac{\sqrt{U_1^2 \cos^2 \varphi + U_0^2}}{U_1 \cos \varphi} = \sqrt{1 + \frac{1}{m^2 \cos^2 \varphi}}$$

Poprawę uzyskuje się, gdy $k > 1$. Przebieg k w funkcji m dla różnych wartości $\cos\varphi$ przedstawia rys. 2. Widać, że poprawę przepustowości uzyskuje się zawsze. Wielkość poprawy musi jednak uzasadniać koszt budowy układów przekształtnikowych.



Rys. 2. Zmiana przepustowości k w funkcji parametru m dla różnych wartości $\cos \varphi$

Poprawa przepustowości opisana wzorem (5) dotyczy założenia równości strat w liniach. Jednak nie uwzględnia strat mocy w przekształtnikach, co dodatkowo nieco obniża tę wartość. Podobnie konieczna jest również rozszerzona analiza rozptyłu mocy biernej w funkcji kąta wysterowania tyrystorów oraz przekładni transformatora prostownikowa w relacji do współczynnika zwiększenia przepustowości i stosunku składowej wartości skutecznej składowej podstawowej i składowej stałej.



Rys. 3. Uproszczony schemat symulacyjny układu hybrydowego przesyłu energii elektrycznej

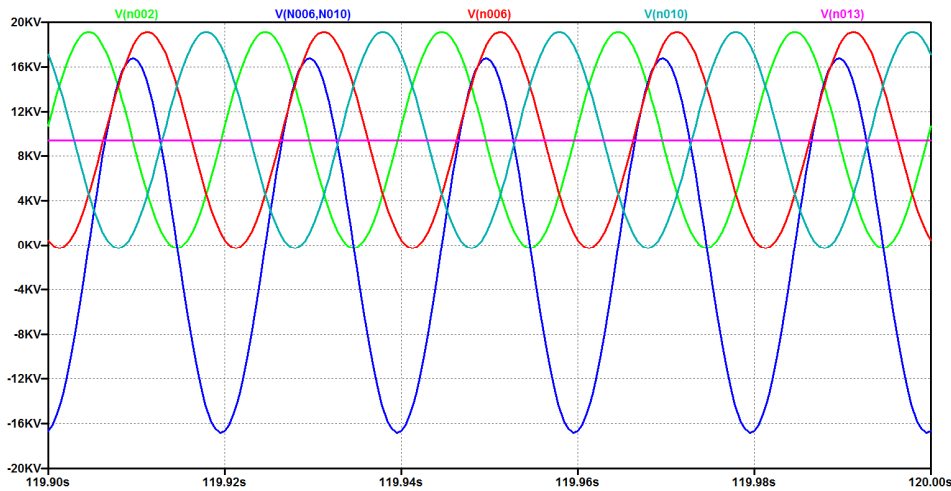
Symulacja pracy układu

Symulacja pracy urządzenia jest dziś podstawową techniką projektowania urządzeń. Autorzy przygotowali model systemu hybrydowego w programie symulacyjnym LTSpice (rys. 3). Dzięki temu możliwe jest rozpoczęcie prac projektowych oraz wstępne określenie właściwości linii i wymagań dla urządzeń składowych, szczególnie dla przekładni transformatorów i konstrukcji prostownika dla różnych trybów pracy systemu

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

hybrydowego w porównaniu do systemu przemiennoprądowego z zachowaniem tej samej linii.

Przygotowany został model do badania zachowania układu z uwzględnieniem możliwości badania sygnałów o częstotliwościach do 1500 Hz, co wymagało odpowiedniego przygotowania modelu linii (większa liczba członów Π) oraz przygotowania modeli prostowników tyrystorowych wraz z układami sterowania. Ze względu na ograniczenia oprogramowania LTSpice (trudność w modelowaniu regulatorów) model służy do badania wybranych stanów dynamicznych oraz stanów statycznych układu. Umożliwia badanie zjawisk dla konkretnych elementów półprzewodnikowych oraz rzeczywistych parametrów elementów biernych. Przykładowe wyniki symulacji przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Przykładowe wyniki symulacji układu hybrydowego (V(n002), V(n006), V(n010) – napięcia fazowe w linii hybrydowej, V(n013) – napięcie źródła prądu stałego, V(N006,N010) – napięcie międzyfazowe linii hybrydowej)

Modelowy, hybrydowy układ przesyłu energii

W Zakładzie Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej wykonano model układu przesyłu energii prądem stałym, złożony z dwóch dwunastopulsowych przekształtników tyrystorowych, zdolnych do pracy dwukierunkowej, o następujących parametrach:

- napięcie zasilania 3x 400 V,
- moc znamionowa 2,5 kVA,
- maksymalne napięcie wyjściowe sekcji sześciopulsowej 70 V (sekcje mogą być łączone szeregowo lub równolegle).

Urządzenie to można wykorzystać do budowy hybrydowego układu zasilania. Przedmiotem obliczeń projektowych jest wyznaczenie przekładni transformatora głównego i przez to napięcia systemu przemiennoprądowego, z którym będzie porównywany układ hybrydowy. Zachowanie odpowiednich proporcji współczynnika m zapewni pracę w warunkach pozwalających na obserwację zjawisk, które później będą występowały w układzie napięcia średniego. Niskie napięcie źródła prądu stałego wymusza niskie napięcie przesyłu prądem przemiennym. Stąd konieczność

wykorzystania szeregowego połączenia sekcji przekształtnika, celem podwyższenia napięcia.

Autorzy założyli, że zwiększenie przepustowości powinno wynosić $k = 3$. Z wykresu z rys. 2 można odczytać, że wymaga to uzyskania stosunku $m = 0,35$, czyli wartość skuteczna napięcia strony dolnej transformatora głównego wynosić musi:

$$(6) \quad U_d = \sqrt{3} U_{0_maks} m = 1,73 \cdot 140 \cdot 0,35 \approx 85 \text{ [V]}.$$

Moc transformatora głównego musi wynosić 1,5 kVA. Wynika to z faktu, że przy $k = 3$ transformator główny przeniesie 1/3 mocy, a przekształtnik 2/3.

Przy tak przyjętych parametrach układu zmniejszenie mocy przesyłanej będzie wymagało obniżenia napięcia przekształtnika, co spowoduje zwiększenie generacji mocy biernej i odkształcenia z powodu konieczności zwiększenia kąta opóźnienia załączenia tyristorów.

Podsumowanie

1. Konieczne jest ponowne przeanalizowanie właściwości techniczno-ekonomicznych i ograniczeń konstrukcyjnych proponowanego rozwiązania.
2. Proponowane rozwiązanie może pomóc przesył energii istniejącymi liniami elektroenergetycznymi i poprawić stopień ich wykorzystania.
3. Dzięki temu możliwe będzie opóźnienie inwestycji w celu zwiększenia mocy przesyłanej, szczególnie gdy linia jest przeciążona w niewielkim stopniu.
4. Zaproponowane rozwiązanie jest współcześnie realizowalne przy akceptowalnych kosztach i zapotrzebowaniu na miejsce.
5. Proponowane rozwiązanie z niezawodnościowego punktu widzenia ma znaczą przewagę nad układami przesyłu prądem stałym.
6. Ograniczeniem układu są: ograniczenia w regulacji mocy biernej i stosowalność ze względu na dopuszczalną wartość skuteczną napięcia, prądu lub strat w linii.
7. Szczególnie dokładnie należy rozważyć problemy zabezpieczenia linii hybrydowej.

Bibliografia

1. Barlik R., Nowak M.: Technika tyrystorowa. WNT, Warszawa 1997.
2. Biczal P., Kłós M.: Czyżby renesans układów tyrystorowych? Nowa Elektrotechnika, nr 5, 2005, str. 8-9.
3. Demienko G. I., Przesył energii elektrycznej prądem pulsującym (w jęz. ros.). Wydawnictwo Uniwersytetu Lwowskiego 1971.
4. Popczyk J., Elektroenergetyczne układy przesyłowe. Skrypty uczelniane, nr 1196, Politechnika Śląska, 1984.

Autorzy: dr hab. inż. Piotr Biczal; Zakład Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej, Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: biczel@ee.pw.edu.pl; inż. Beata Antosiewicz, studentka studiów II stopnia, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska