

Zygmunt MACIEJEWSKI*

Sieci przesyłowe jako element bezpieczeństwa elektroenergetycznego Polski

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono aktualny stan sieci przesyłowej krajowego systemu elektroenergetycznego. Zwrócono uwagę na rosnącą dysproporcję między produkcją energii elektrycznej a rozbudową systemu przesyłowego, który jest niedoinwestowany. Na tej podstawie oceniono stan bezpieczeństwa elektroenergetycznego i jego wpływ na bezpieczeństwo energetyczne kraju. Zaproponowano kierunki rozbudowy i modernizacji krajowej sieci przesyłowej dla zapewnienia bezpieczeństwa elektroenergetycznego i rozwoju kraju.

SŁOWA KLUCZOWE: energia elektryczna, system elektroenergetyczny, sieci przesyłowe, bezpieczeństwo elektroenergetyczne

Wprowadzenie

W elektroenergetyce występują takie pojęcia jak: system elektroenergetyczny, sieć elektroenergetyczna, sieć przesyłowa, sieć przesyłowo rozdzielcza, sieć rozdzielcza.

Zgodnie z definicją podaną w Słowniku Współczesnym Języka Polskiego [1]:

System – jest to uporządkowany układ elementów i określonych relacji między nimi, które tworzą pewną całość.

* Dr hab. inż., prof. PR – Politechnika Radomska, Wydział Transportu, Zakład Elektrotechniki i Energetyki, Radom.

A zatem:

System elektroenergetyczny – jest to zbiór urządzeń przeznaczonych do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, połączonych ze sobą funkcjonalnie dla realizacji procesu ciągłej dostawy energii elektrycznej odbiorcom.

Sieć elektroenergetyczna – jest to zespół połączonych ze sobą funkcjonalnie urządzeń do przesyłania i rozdzielania energii elektrycznej. Do podstawowych zadań sieci należy wyprowadzenie mocy z elektrowni, jej przesył na czasami znaczne odległości i rozdział pomiędzy odbiorców przy zachowaniu właściwej jakości energii elektrycznej (napięcie, częstotliwość, wyższe harmoniczne, symetria prądów i napięć), niezawodnej dostawy, ekonomiczności oraz bezpieczeństwa.

Sieć przesyłowa – jest to sieć elektroenergetyczna 750, 400, 220 kV, zapewniająca możliwość przesyłu dużych ilości energii elektrycznej na znaczne odległości, realizację współpracy międzynarodowej z sąsiednimi systemami i wyprowadzenie mocy z wielkich elektrowni.

Sieć przesyłowo-rozdzielcza (sieć dosyłowa, sieć wstępnego rozdziału) – jest to sieć elektroenergetyczna wysokiego napięcia 110 kV, stanowiąca ogniwo pośrednie pomiędzy siecią przesyłową a siecią rozdzielczą, do której są również przyłączone niektóre elektrownie i duże zakłady przemysłowe.

Sieć rozdzielcza – sieć elektroenergetyczna średniego (15 kV) i niskiego napięcia (400/230 V), do której zadań należy rozdzielanie i dostarczanie energii elektrycznej do średnich i drobnych odbiorców.

Bezpieczeństwo energetyczne kraju jest zapewnione gdy zachowana jest ciągła, o odpowiedniej ilości i jakości, dostawa nośników energii do wszystkich odbiorców. Oznacza to, że musi być zapewniona dostawa nośników energii pierwotnej, ich przetworzenie, przesył i dystrybucja do odbiorców w postaci nośników energii końcowej. W warunkach krajowych nośnikami energii pierwotnej są: węgiel kamienny i brunatny, ropa i gaz ziemny, natomiast nośnikami energii końcowej są głównie: energia elektryczna, przetwory ropy naftowej, gaz a także węgiel kamienny.

Nośnikami energii decydującymi o bezpieczeństwie energetycznym kraju są zatem:

- ✧ węgiel kamienny i brunatny pozyskiwany w kraju,
- ✧ ropa i gaz ziemny w znacznych ilościach importowane z zagranicy,
- ✧ energia elektryczna wytwarzana w kraju i pokrywająca dotychczas w pełnym zakresie zapotrzebowanie krajowe.

Wpływ poszczególnych nośników energii na bezpieczeństwo energetyczne kraju jest bardzo zróżnicowany. Skutki przerw w dostawie gazu lub przetworów ropy naftowej nie powodują tak negatywnych skutków dla gospodarki jak przerwy w dostawie energii elektrycznej. Świadczą o tym duże elektroenergetyczne awarie systemowe na świecie, które spowodowały policzalne straty gospodarcze wynoszące miliardy dolarów, a także znaczne straty niepoliczalne poniesione przez indywidualnych odbiorców. Zestawienie niektórych tych awarii, które zakończyły się black-out'em, są przedstawione w tabeli 1 [2].

Z analizy tych awarii wynika, że główną ich przyczyną były awarie sieci przesyłowych, natomiast w znacznie mniejszym stopniu były spowodowane deficytem mocy. Awarie sieciowe były powodowane przede wszystkim niedoinwestowaniem oraz niezadawalającym

TABELA 1. Wybrane awarie systemów elektroenergetycznych

TABLE 1. Select breakdown of power systems

Data	Miejsce	Wyłączenia
1965	USA (płn.-wsch.), Kanada (Ontario)	20 000 MW, ok. 30 mln odbiorców
1972	Polska (Dolny Śląsk)	3500 MW zapotrzebowania
1977	USA (Nowy Jork)	6000 MW, ok. 9 mln odbiorców
1978	Francja	28 000 MW, ok. 75% zapotrzebowania
1981	Wielka Brytania	1900 MW zapotrzebowania
1983	Szwecja	11 400 MW zapotrzebowania
1985	Francja	4300 MW, wyłączenie 7 bloków
1987	Polska (płn.-wsch.), El. Ostrołęka	920 MW zapotrzebowania
1987	Francja (Bretania)	spadki napięć, wył. generatorów
1994	Włochy	2000 MW zapotrzebowania
1996	USA, Kanada, Meksyk – rejon Zach.	11 850 MW, ok. 2 mln odbiorców
1996	USA, Kanada, Meksyk – rejon Zach.	28 000 MW, ok. 7,5 mln odbiorców
1998	Kanada (Quebec)	2000 MW, ok. 1,7 mln odbiorców
1998	USA (płn.), Kanada (Ontario)	950 MW zapotrzebowania
1998	USA (Nowy Jork)	10 280 MW zapotrzebowania
1999	Francja	ok. 1918 tys. odbiorców
2003	Algieria (płn.)	4200 MW zapotrzebowania
2003	Portugalia	550 MW zapotrzebowania
2003	Wielka Brytania (Londyn)	800 MW zapotrzebowania
2003	Meksyk (5 stanów)	ok. 4 mln odbiorców
2003	Szwecja, Dania	ok. 4 mln odbiorców
2003	Włochy	największy black-out w Europie
2006	Polska (płn.-wsch.), El. Ostrołęka	black-out płn.-wsch. rejon kraju
2008	Polska (płn.-zach.)	black-out płn.-zach. rejon kraju

stanem technicznym linii i stacji elektroenergetycznych, natomiast w mniejszym stopniu nieprawidłowym działaniem układów zabezpieczeń i sterowania oraz błędami dyspozytorów.

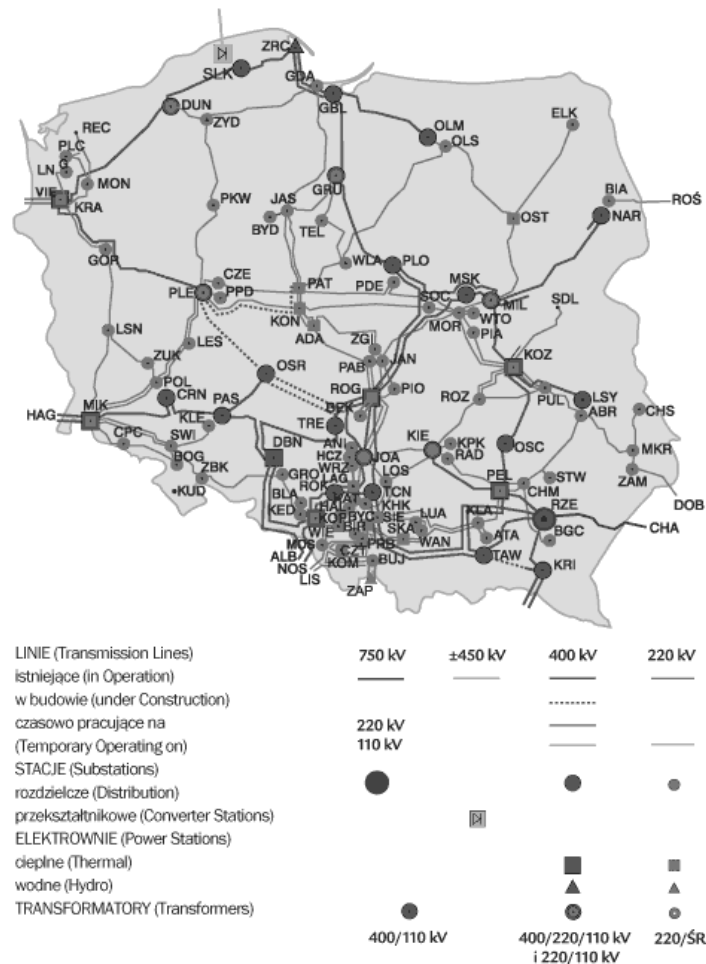
Bezpieczeństwo energetyczne kraju zależy zatem głównie od bezpieczeństwa elektroenergetycznego, przy czym na stopień tego bezpieczeństwa bezpośredni wpływ ma stan, struktura i możliwości przesyłowe krajowej sieci najwyższych napięć, a także dyspozycyjność sieci dystrybucyjnych i rozdzielczych.

1. Krajowy system elektroenergetyczny

Krajowy system elektroenergetyczny składa się z trzech podsystemów:

- ❖ wytwarzania energii elektrycznej,
- ❖ przesyłu energii elektrycznej siecią elektroenergetyczną najwyższych napięć,
- ❖ dystrybucji i dostawy energii elektrycznej sieciami dystrybucyjnymi wysokich, średnich i niskich napięć.

Ogólny schemat sieci przesyłowej najwyższych napięć (750, 400, 220 kV) wraz z połączeniami zagranicznymi krajowego systemu elektroenergetycznego jest przedstawiony na rysunku 1 [3].



Rys. 1. Stacje i linie przesyłowe krajowego systemu elektroenergetycznego 750 kV, 450 kV, 400 kV, 220 kV

Fig. 1. Substations and transmission lines of the Polish National Power System 750 kV, 450 kV, 400 kV, 220 kV

Moc zainstalowana w krajowych elektrowniach na koniec 2006 roku wyniosła 35 715 MW, natomiast moc osiągalna wartość 35 033 MW. Produkcja energii elektrycznej w 2006 roku osiągnęła wartość 161,7 TW·h i była większa o 3,1% niż w 2005 roku. Krajowe zużycie energii w 2006 roku osiągnęło wartość 150,7 TW·h i było najwyższe w historii krajowej elektroenergetyki. Do 2006 roku największe zużycie energii elektrycznej w kraju wynosiło 148,8 TW·h i było osiągnięte w 1988 roku. W ogólnym bilansie wymiany energii z zagranicą, krajowy system elektroenergetyczny w 2006 roku był eksporterem energii elektrycznej, który wyniósł 11 TW·h. Podstawowe dane dotyczące krajowej produkcji i zużycia energii elektrycznej oraz energii elektrycznej wprowadzonej do sieci systemu elektroenergetycznego w latach 1995–2006 [3] są przedstawione w tabelach 2 i 3.

TABELA 2. Produkcja i zużycie energii elektrycznej w krajowym systemie elektroenergetycznym w latach 1995–2006

TABLE 2. Electric energy production and consumption in the power system of Poland during the years 1995–2006

Wyszczególnienie	1995	2000	2005	2006
Moc zainstalowana na koniec roku [MW]	33 160	34 595	35 404	35 715
Moc osiągalna na koniec roku [MW]	32 125	33 418	34 857	35 033
Maksymalne zapotrzebowanie mocy [MW]	23 056	22 289	23 477	24 640
Produkcja energii elektrycznej ogółem [TW·h]	139,0	145,2	156,9	161,7
Krajowe zużycie energii elektrycznej [TW·h]	136,2	138,8	145,7	150,7
Wymiana energii elektrycznej z zagranicą [TW·h]	2,8	6,4	11,2	11,0
Straty i różnice bilansowe [TW·h]	14,4	14,4	14,6	14,0

Dane zawarte w tabelach 2 i 3 charakteryzują sektor wytwórczy krajowego systemu elektroenergetycznego.

Z danych tych wynika, że w latach 1995–2006 nastąpił:

- ✧ wzrost produkcji energii elektrycznej w krajowych elektrowniach o 16,3%,
- ✧ wzrost krajowego zużycia energii elektrycznej o 10,6%,
- ✧ wzrost wprowadzonej energii elektrycznej do sieci 400 i 220 kV o 16,9%,
- ✧ wzrost wprowadzonej energii elektrycznej do sieci 110 kV o 15,7%,
- ✧ wzrost wprowadzonej energii elektrycznej do sieci średniego i niskiego napięcia o 20,2%.

Tabela 4 charakteryzuje sektor przesyłowy krajowego systemu elektroenergetycznego. W tabeli tej są podane podstawowe dane dotyczące długości napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokich, średnich i niskich napięć, długości linii kablowych, liczby stacji elektroenergetycznych, liczby transformatorów sieciowych oraz ich mocy w latach 1995–2006 [4].

Z danych zawartych w tabeli 4 wynika, że w latach 1995–2006 nastąpił:

- ✧ wzrost długości linii 750, 400 i 220 kV o 2,6%,
- ✧ wzrost długości linii 110 kV o 1,7%,

TABELA 3. Bilans energii elektrycznej w sieciach 400, 220, 110 kV oraz w sieciach średnich i niskich napięć w latach 1995–2006

TABLE 3. Electric energy balance in lines of 400, 220, 110 kV and lines of medium voltages during the years 1995–2006

Wyszczególnienie	1995	2000	2005	2006
Sieć 400 i 220 kV [TW·h]				
✧ energia wprowadzona do sieci,	80,3	80,9	89,9	93,9
✧ energia wyprowadzona z sieci	78,4	79,4	88,0	91,9
✧ straty i różnice bilansowe	1,9	1,5	1,9	2,0
✧ straty i różnice bilansowe [%]	2,37	1,85	2,11	2,13
Sieć 110 kV [TW·h]				
✧ energia wprowadzona do sieci	109,5	112,7	120,7	126,7
✧ energia wyprowadzona z sieci	106,0	110,0	117,6	123,2
✧ straty i różnice bilansowe	3,5	2,7	3,1	3,5
✧ straty i różnice bilansowe [%]	3,20	2,40	2,57	2,76
Sieć średniego i niskiego napięcia [TW·h]				
✧ energia wprowadzona do sieci	79,8	84,7	92,0	95,9
✧ energia wyprowadzona z sieci	67,2	75,1	82,8	87,3
✧ straty i różnice bilansowe	12,6	9,6	9,2	8,6
✧ straty i różnice bilansowe [%]	15,79	11,33	10,00	8,97

Uwaga: Tabele 2 i 3 nie zawierają żadnych informacji dotyczących 2007 roku. Według danych operacyjnych PSE – Operator S.A. w 2007 roku krajowa produkcja energii elektrycznej wyniosła 159,5 TWh przy krajowym zużyciu 154,2 TWh i wymianie z zagranicą 5,3 TWh.

- ✧ wzrost długości linii średnich napięć o 5,7%,
- ✧ wzrost długości linii niskich napięć o 2,4%,
- ✧ wzrost długości wszystkich linii o 3,7%,
- ✧ wzrost liczby stacji o górnym napięciu 750, 400, 220 kV o 7,7%,
- ✧ wzrost liczby stacji o górnym napięciu 110 kV o 8,4%,
- ✧ wzrost liczby stacji średnich napięć o 15,2%,
- ✧ wzrost liczby transformatorów sieciowych o górnym napięciu 750, 400 i 220 kV o 11,0%,
- ✧ wzrost liczby transformatorów sieciowych o górnym napięciu 110 kV o 9,9%,
- ✧ wzrost mocy transformatorów sieciowych o górnym napięciu 750, 400 i 220 kV o 14,7%,
- ✧ wzrost mocy transformatorów sieciowych o górnym napięciu 110 kV o 13,5%,
- ✧ wzrost mocy transformatorów sieciowych średnie napięcie/niskie napięcie o 26,1%.

Z przedstawionego zestawienia wynika, że w latach 1995–2006 wzrost długości wszystkich linii krajowego systemu elektroenergetycznego, które mają decydujący wpływ na bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju, wyniósł 3,7%, w tym: wzrost długości linii najwyższych napięć 400 i 220 kV o 2,6%, a linii 110 kV o 1,7%. Jest to wzrost zdecydowanie mniejszy od wzrostu krajowej produkcji, wprowadzenia do sieci i zużycia energii elektrycznej oraz mocy transformatorów sieciowych. Oznacza to, że w latach 1995–2006 nastąpiło zwiększenie dysproporcji między sektorem wytwórczym i przesyłowym kra-

TABELA 4. Elektroenergetyczne sieci przesyłowe i rozdzielcze w latach 1995–2006

TABLE 4. Network equipment of the power system of Poland during the years 1995–2006

Wyszczególnienie	Jednostka	1995	2000	2005	2006
Długość linii elektroenergetycznych napowietrznych:					
◇ najwyższe napięcia					
750 kV	km	114	114	114	114
400 kV	km	4 552	4 660	4 831	4 919
220 kV	km	8 174	8 116	8 123	8 140
Razem:	km	12 840	12 890	13 068	13 173
◇ wysokie napięcia 110 kV	km	31 817	32 284	32 310	32 344
◇ średnie napięcia	km	221 391	223 800	233 855	234 105
◇ niskie napięcia	km	281 369	284 116	286 994	288 061
Razem wszystkie napięcia	km	547 417	553 090	566 227	567 683
Długość linii elektroenergetycznych kablowych:					
◇ wysokie napięcia	km	45	48	79	93
◇ średnie napięcia	km	48 856	54 345	61 988	62 976
◇ niskie napięcia	km	91 383	105 755	125 776	128 575
Razem wszystkie napięcia	km	140 284	160 148	187 843	191 644
Liczba stacji o górnym napięciu:					
◇ 750 i 400 kV	szt.	27	30	31	31
◇ 220 kV	szt.	64	64	67	67
◇ 110 kV	szt.	1 252	1 308	1 356	1 357
◇ średnie napięcia	szt.	206 535	219 418	236 067	237 827
Razem wszystkie napięcia	szt.	207 878	220 820	237 521	239 282
Liczba transformatorów sieciowych o przekładni:					
◇ 750/400, 400/220, 400/110, 220/110 kV	szt.	155	160	168	172
◇ 110/średnie napięcie kV	szt.	2 308	2 441	2 527	2 536
◇ średnie napięcie/średnie napięcie kV	szt.	304	277	264	259
◇ średnie napięcie/niskie napięcie kV	szt.	208 142	222 958	237 595	240 020
Razem	szt.	210 909	225 836	240 554	242 987
Moc transformatorów sieciowych o przekładni:					
◇ 400/220, 400/110, 220/110 kV	MVA	33 302	35 172	37 812	38 212
◇ 110/średnie napięcie kV	MVA	42 062	44 714	46 904	47 722
◇ średnie napięcie/średnie napięcie kV	MVA	1 342	1 274	1 055	1 027
◇ średnie napięcie/niskie napięcie kV	MVA	32 984	37 612	40 858	41 593
Razem	MVA	109 690	118 772	126 629	128 554

owego systemu elektroenergetycznego. Nastąpiło zatem dalsze zwiększenie niedoinwestowania krajowego systemu przesyłowego i tym samym zmniejszenie bezpieczeństwa elektroenergetycznego, które ma decydujący wpływ na ogólny stan bezpieczeństwa energetycznego kraju. Potwierdzeniem tej tezy są ostatnio zaistniałe w kraju awarie systemowe: w północno-wschodniej części krajowego systemu elektroenergetycznego w rejonie elektrowni Ostrołęka w 2006 roku, gdzie nastąpiła utrata stabilności napięciowej oraz w północno-zachodniej części krajowego systemu elektroenergetycznego, w rejonie elektrowni Dolna Odra w 2008 roku, której przyczyną były awarie sieci przesyłowych.

Zwiększenie dysproporcji między sektorem wytwarzania i sektorem przesyłowym systemu elektroenergetycznego powoduje powiększenie kąta rozchylenia między wektorami sem współpracujących generatorów. Oznacza to zmniejszenie zapasu stabilności statycznej, co znacznie pogarsza niezawodność systemu elektroenergetycznego w ustalonych stanach pracy. Powoduje to również zmniejszenie zapasu stabilności przejściowej (dynamicznej), czego skutkiem jest obniżenie odporności systemu elektroenergetycznego na nagłe zakłócenia wywołane zwarciami lub zmianami obciążeń.

Niedoinwestowanie krajowego systemu przesyłowego powoduje również zwiększenie strat sieciowych. Straty te w krajowym systemie elektroenergetycznym są znaczne i wynoszą rocznie około 14 TW·h (tab. 3).

Budowa układu przesyłowego 400 kV Ostrów – Plewiska (Poznań) (rys. 1), który ma istotny wpływ na zwiększenie niezawodności współpracy krajowego systemu przesyłowego z systemami krajów Unii Europejskich, trwa już 14 lat. Uruchomienie tego układu przesyłowego, które powinno już nastąpić kilka lat temu, zmniejszyło by straty mocy w zależności od pory dnia i roku, od 10 do 50 MW. W skali roku daje to zmniejszenie strat energii około 0,2 TW·h. Jest to wartość porównywalna z półrocznym wytwarzaniem energii elektrycznej przez pracujące w kraju elektrownie wiatrowe.

2. Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju

Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju zależy:

- ✧ od zdolności systemu elektroenergetycznego do dostawy odbiorcom w stanach ustalonych wymaganej ilości mocy i energii z uwzględnieniem możliwości wytwórczych elektrowni, linii przesyłowych i transformatorów sieciowych oraz planowanych i nieplanowanych wyłączeń elementów systemu oraz
- ✧ od zdolności systemu elektroenergetycznego do zachowania stabilności pracy w przypadku wystąpienia awarii powodowanych zwarciami oraz nagłymi nieprzewidywalnymi wyłączeniami elementów systemu.

Spełnienie obu tych warunków jest niezbędne do zachowania bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju. Energia elektryczna z elektrowni, nawet przy znacznej rezerwie mocy, nie będzie dostarczona do odbiorcy przy braku wystarczającej możliwości przesyłowej systemu oraz zdolności do zachowania stabilności i odwrotnie, jeśli brakuje mocy w elektrowniach wysoki stopień możliwości przesyłowych i stabilności nie zapewnia dostawy energii elektrycznej do odbiorców.

Rozbudowa, modernizacja i doinwestowanie systemu przesyłowego ma bezpośredni wpływ na wzrost bezpieczeństwa elektroenergetycznego, a zatem na zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju. Obecny stan sieci przesyłowej nie spełnia w zadawalającym stopniu wymagań zachowania bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju. Stan ten wynika przede wszystkim z braku rozbudowy w ostatnich latach sieci przesyłowych

400 kV. Stan obecny linii 400 kV, przedstawiony na rysunku 1, różni się od stanu jaki był w 1995 roku wybudowaniem następujących linii:

- ✧ linie krajowe: dwutorowa linia Dobrzeń–Wielopole, jednotorowa linia Tarnów–Krosno,
- ✧ linie międzynarodowe: jednotorowa linia Krosno–Lemeszany (Słowacja), jednotorowa linia kablowa prądu stałego Słupsk–Starno (Szwecja).

Nowe połączenia liniowe o napięciu 220 kV nie są budowane w kraju od 1985 roku. Uznano wówczas, że podstawowy system przesyłowy krajowego systemu elektroenergetycznego powinny stanowić linie 400 kV, a podstawowe stopniowanie napięć jako rozwiązanie najbardziej ekonomiczne to linie o napięciach: 400/110/15/0,4 kV.

Linie przesyłowe najwyższych napięć są najsłabszym elementem krajowego systemu elektroenergetycznego. Brak dalszej rozbudowy sieci przesyłowej 400 kV, szczególnie w północnej części kraju (rys. 1), zagraża bardzo poważnie bezpieczeństwu elektroenergetycznemu. Od wielu lat przyjmowane plany rozbudowy i modernizacji linii przesyłowych najwyższych napięć nie były i nie są w pełni realizowane. Świadczy o tym m.in. wieloletnia budowa układu przesyłowego 400 kV Rogowiec (el. Bełchatów)–Ostrów–Plewiska (Poznań). Układ ten jest niezmiernie ważny dla zapewnienia bezpiecznego wyprowadzenia mocy z największej krajowej elektrowni (el. Bełchatów), stabilności pracy systemu oraz współpracy równoległej z systemami krajów Europy Zachodniej (Unia ds. Koordynacji Przesyłu Energii Elektrycznej – UCTE).

Optymistyczne, oficjalne prognozy wzrostu krajowego zapotrzebowania na energię elektryczną, przy braku odpowiedniej rozbudowy i modernizacji linii przesyłowych, nie będą możliwe do zrealizowania. Stanowiąc to będzie poważne ograniczenie realizacji planów wzrostu rozwoju gospodarczego kraju.

W związku z planowaną budową elektrowni atomowej na Litwie i przesyłem mocy z tej elektrowni do krajowego systemu jest niezbędna budowa dwutorowej linii 400 kV w relacji Litwa–Ełk oraz rozbudowa systemu przesyłowego w północno-wschodniej części kraju. Dotyczy to budowy linii 400 kV Ełk–Białystok oraz przebudowy i modernizacji istniejących linii 220 kV: Ełk–Ostrołęka, Ostrołęka–Miłosna (Warszawa), Ostrołęka–Olsztyn na napięciu 400 kV lub budowy nowych linii 400 kV. Ponadto, w związku z planowanym znacznym rozwojem elektroenergetyki wiatrowej, szczególnie w północno-zachodniej części kraju, jest niezbędna rozbudowa w tym rejonie linii przesyłowych najwyższych napięć, a przede wszystkim linii dystrybucyjnych 110 kV oraz sieci rozdzielczych 15 kV.

Uzyskanie pozwolenia na budowę nowych obiektów elektroenergetycznych, szczególnie linii przesyłowych, ze względu na ochronę środowiska, jest bardzo utrudnione. Z tego względu od kilkunastu lat dąży się do maksymalnego ale jednocześnie bezpiecznego, przy zachowaniu warunków stabilności, wykorzystania możliwości przesyłowych istniejących linii.

Możliwości przesyłowe krótkich linii elektroenergetycznych są ograniczone dopuszczalnym obciążeniem termicznym przewodów. W liniach długich o dużej reaktancji X , ograniczenie stanowi tzw. granica statycznej możliwości przesyłu (*static transmission capacity*), która jest na ogół mniejsza od termicznej możliwości przesyłowej linii. Zmniejszenie wartości reaktancji linii wpływa bezpośrednio na zwiększenie statycznej granicy przesyłu oraz poprawia warunki zachowania stabilności statycznej i dynamicznej pracy systemu elektroenergetycznego.

Zmniejszenie wartości reaktancji linii uzyskuje się przez stosowanie w liniach elektroenergetycznych przewodów wiązkowych, przy czym im większa liczba przewodów w wiązce tym mniejsza jest reaktancja linii.

W krajowym systemie elektroenergetycznym przewody wiązkowe są stosowane w liniach 400 kV. Standardowe wyposażenie tych linii stanowią przewody stalowo-aluminiowe AFL-8 o przekroju $2 \cdot 525$ [mm²] tzn. o łącznym przekroju 1050 mm². Wiązkę tworzą zatem tylko dwa przewody na fazę, które są prowadzone w odległości 40 cm od siebie. Reaktancja jednostkowa tych linii dla typowych słupów 400 kV stosowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym wynosi 0,335 [Ω/km].

W przypadku zastosowania przewodów wiązkowych $3 \cdot 350$ [mm²] lub $7 \cdot 150$ [mm²], a więc o takim samym przekroju roboczym przewodów 1050 [mm²] jak przewody wiązkowe $2 \cdot 525$ [mm²], uzyskuje się odpowiednio następujące reaktancje jednostkowe linii:

- ✧ dla trzech przewodów w wiązce 0,305 [Ω/km],
- ✧ dla siedmiu przewodów w wiązce 0,268 [Ω/km].

Oznacza to zmniejszenie jednostkowej reaktancji linii w odniesieniu do wiązki dwuprzewodowej odpowiednio o 9 i 20%. Są to znaczne zmniejszenia wartości reaktancji linii.

Podstawowe korzyści wynikające ze stosowania przewodów wiązkowych to przede wszystkim zwiększenie możliwości przesyłu mocy czynnej liniami elektroenergetycznymi, zwiększenie zapasu stabilności statycznej (lokalnej) w ustalonych stanach pracy systemu oraz zwiększenie odporności systemu na zakłócenia dynamiczne (stabilność przejściowa). Ponadto przewody wiązkowe umożliwiają zwiększenie obciążalności linii ze względu na lepsze warunki chłodzenia oraz powodują zmniejszenie strat napięcia, zwiększenie mocy naturalnej linii oraz zmniejszenie strat mocy czynnej wynikające z ograniczenia ulotu. Ograniczenie ulotu z przewodów wiązkowych korzystnie wpływa na obniżenie poziomu hałasu oraz zakłóceń radioelektrycznych wytwarzanych przez linie elektroenergetyczne, szczególnie w czasie złej pogody.

Wyszczególnione zalety przewodów wiązkowych mają istotny wpływ na poprawę bezpieczeństwa pracy systemu. W krajowym systemie elektroenergetycznym tylko międzynarodowa linia 400 kV Krosno–Lemeszany (Słowacja) została wybudowana z przewodami wiązkowymi $3 \cdot 350$ [mm²]. W budowanej nowej dwutorowej linii 400 kV Kromolice–Pątnów przewiduje się zastosowanie potrójnej wiązki przewodów AFL-8 350 [mm²] w każdej fazie.

Korzyści wynikające ze stosowania przewodów wiązkowych, szczególnie o większej liczbie przewodów w wiązce, mają istotny wpływ na poprawę bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju, w którym niedoinwestowanie linii przesyłowych najwyższych napięć jest znaczne. Z tego względu przy modernizacji istniejących krajowych linii 400 kV należy rozważyć celowość zwiększenia liczby przewodów w wiązce. W systemach europejskich w liniach 400 kV jako układ standardowy stosuje się cztery przewody w wiązce. W linii przesyłowej wybudowanej w Japonii, dzięki odpowiedniemu zwiększeniu liczby przewodów i ich ułożeniu w wiązce, uzyskano w odniesieniu do układu standardowego zmniejszenie reaktancji linii aż o 30% [5].

Zwiększenie wykorzystania możliwości przesyłowych istniejących linii najwyższych napięć i całych systemów elektroenergetycznych umożliwiły również urządzenia FACTS

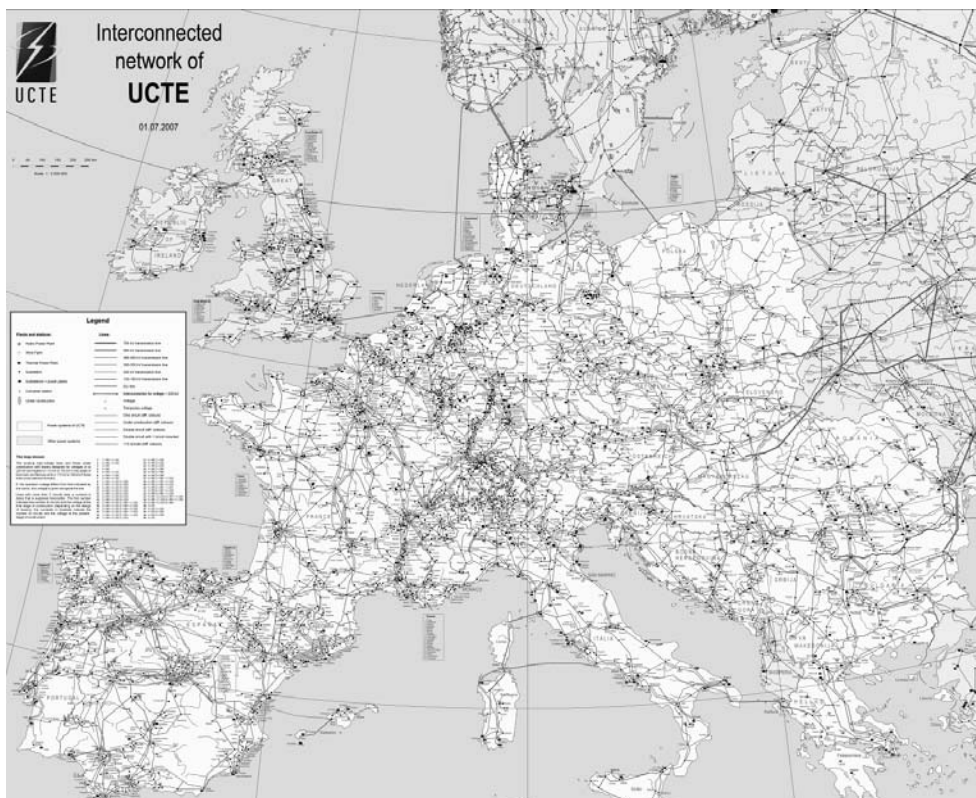
(Układy Elastycznego Przesyłu Prądu Przemienneego – *Flexible Alternating Current Transmission System*). Są to urządzenia instalowane w systemach elektroenergetycznych wykorzystujące sterowane elektronicznie układy tyrystorowe. Tyrystory przewodzą prądy wartości kilku kiloamperów oraz blokują napięcia kilku kilowoltów, reagują w ciągu milisekund na sygnał sterujący załączając lub wyłączając dany element (dławiki, kondensatory) [6,7,8]. Zwiększenie możliwości i pewności przesyłu mocy w istniejących systemach elektroenergetycznych do termicznej wytrzymałości linii oraz sterowanie tymi przesyłami w stanach ustalonych jest podstawowym celem zastosowań urządzeń FACTS. Cele te uzyskuje się przez regulacje reaktancji linii, napięć oraz kątów rozchylenia między wektorami napięć. Urządzenia FACTS mają również wpływ na pracę systemu elektroenergetycznego w stanach niustalonych wywołanych zakłóceniami dynamicznymi, np. zwarciami. Szybkość regulacji poszczególnych elementów w tych układach stwarza dodatkowe możliwości ich wykorzystania do poprawy stabilności systemu przez odpowiednie oddziaływanie na przebiegi stanów niustalonych.

W systemach elektroenergetycznych stosuje się w zależności od potrzeb i możliwości rozmaite urządzenia FACTS. Do typowych urządzeń FACTS zalicza się:

- ✧ kompensator statyczny SVC (*Static Var Compensator*) – układ spełniający funkcję stabilizatora napięcia w węźle,
- ✧ statyczny kondensator STATCOM (*Static Condenser*) – układ spełniający funkcję płynnie regulowanego źródła prądu biernego wprowadzanego do sieci,
- ✧ tyrystorowy układ kompensacji szeregowej TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) – układ spełniający funkcję płynnie regulowanej reaktancji podłużnej linii przesyłowych,
- ✧ regulator fazy sterowany tyrystorowo TCPR (*Thyristor Controlled Phase Regulator*) – układ zmieniający kąt rozchylenia między wektorami napięć na krańcach linii,
- ✧ zunifikowany układ sterowania przesyłem mocy UPFC (*Unified Power Flow Controller*) – układ zmieniający moduł i argument napięcia.

Obecnie w krajowym systemie elektroenergetycznym nie ma jeszcze zainstalowanych urządzeń FACTS. Dla zapewnienia bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju wprowadzenie tych urządzeń do eksploatacji należy uznać za celowe i uzasadnione. Zainstalowanie w systemie elektroenergetycznym urządzeń FACTS wymaga jednak znacznych nakładów finansowych oraz opracowanie i wdrożenie specjalnych programów służących do sterowania tymi urządzeniami. Z tego względu podjęcie decyzji o zainstalowaniu i wykorzystywaniu urządzeń FACTS wymaga wykonania specjalnych studiów zarówno technicznych, jak i ekonomicznych. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (PSE) we współpracy z Instytutem Energetyki Oddział Gdańsk oraz z Electric Power Research Institut (EPRI – USA) wykonały w latach 1998–1999 wspólny projekt na temat „Przystosowanie polskiego systemu elektroenergetycznego do pracy w zmiennych warunkach gospodarki rynkowej przy wykorzystaniu technologii FACTS” [9, 10]. Z prac tych wynika, że ze względów zarówno technicznych jak i ekonomicznych uzasadnione będzie zainstalowanie urządzeń FACTS w krajowym systemie elektroenergetycznym około 2010 roku.

W systemach elektroenergetycznych Europy zachodniej, w której sieć przesyłowa najwyższych napięć jest zdecydowanie bardziej rozbudowana niż w krajowym systemie elek-



Rys. 2. Europejska sieć przesyłowa najwyższych napięć

Fig. 2. Interconnected network of Europe

troenergetycznym (rys. 2), urządzenia FACTS są instalowane i eksploatowane już od wielu lat.

Zakończenie

Dyskutując na temat bezpieczeństwa energetycznego kraju ma się głównie na myśli problemy dotyczące niezawodnej dostawy gazu i ropy. W dyskusjach tych, zagadnienia dotyczące bezpieczeństwa elektroenergetycznego są zazwyczaj pomijane lub są uważane za zdecydowanie za mniej istotne. W rzeczywistości jest na odwrót. Nawet krótkotrwałe przerwy w dostawie energii elektrycznej odbiorcom powodują nie tylko znaczne straty materialne, paraliżują funkcjonowanie kraju, ale również stanowią zagrożenie dla życia i bezpieczeństwa państwa jako całości. Z tego powodu w dyskusjach i rozważaniach na temat bezpieczeństwa energetycznego, stan bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju

powinien być uwzględniony przynajmniej na takim samym jak nie na wyższym poziomie niż niezawodność dostaw gazu i ropy. Świadczą o tym awarie elektroenergetyczne, które ostatnio miały miejsce w kraju (Ostrołęka, Szczecin) oraz zagranicą (tab. 1).

O stanie bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju decydują sektory wytwarzania oraz przesyłu, dystrybucji i rozdziału energii elektrycznej, czyli sieci elektroenergetyczne. Z przeprowadzonych rozważań wynika, że dla zapewnienia bezpieczeństwa elektroenergetycznego należy przede wszystkim rozbudować sieć przesyłową, szczególnie w północnych rejonach kraju. Należy również modernizować istniejące linie elektroenergetyczne wprowadzając przewody wielowiązkowe oraz instalować urządzenia FACTS służące do maksymalnego wykorzystania możliwości przesyłowych systemu. Opóźnienia w realizacji planów rozbudowy systemu elektroenergetycznego, niezależnie od możliwości wytwórczych krajowych elektrowni, zagrażają nie tylko bezpieczeństwu energetycznemu, ale stanowią również ograniczenie dla rozwoju kraju oraz wzrostu dochodu narodowego.

Literatura

- [1] Słownik współczesny języka polskiego Wydawnictwo Wilga, Warszawa 1988.
- [2] KASPRZYK S., 2003 – Bezpieczeństwo pracy polskiego systemu elektroenergetycznego. Warszawa.
- [3] Krajowy System Elektroenergetyczny, PSE – Operator S.A. 2006
- [4] Statystyka Elektroenergetyki Polskiej 2006. Agencja Rynku Energii S.A., Warszawa 2007.
- [5] CAUSEY W., 2000 – Innovative bund ling reduces HV Line inductance. Electrical World, January/February 2000.
- [6] ADAPA R., 1995 – Summary of EPRI's FACTS Systems Studies. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- [7] EDRIS A., 1996 – Technology Development of Flexible AC Transmission System. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- [8] MACHOWSKI J., 1997 – Elastyczne systemy przesyłowe prądu przemiennego (FACTS). Elektroenergetyka, PSE S.A. 1.
- [9] Application of FACTS Technology to the Polish Power Grid Task 1 – Assessment of the Polish Power Grid from the point of view of possible application of FACTS devices, Institute of Power Engineering, Division, Gdańsk 1988.
- [10] Application of FACTS Technology to the Polish Power Grid, Final Report, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA 1999.

Zygmunt MACIEJEWSKI

Transmission systems as elements of security of the Polish Power Grid

Abstract

In the paper current state of the Polish Power System is presented. Disproportions between production electricity and technology development of the network system are observed. The network system is not sufficient invested. It is estimated that security of the power system has significant influence on energy security. There are proposed some directions of the network system developing and modernization in order to ensure of security of the power system and in general development of Poland.

KEY WORDS: electricity, power system, network systems, security of the power system