

Elektroenergetyka – problemy i wyzwania

cz. II. Wybrane aspekty techniczne

Kontynuacja artykułu z poprzedniego numeru Biuletynu AGH

Przesył energii elektrycznej liniami kablowymi jest stosowany w warunkach, w których nie jest możliwy albo nie jest uzasadniony przesył liniami napowietrznymi, na przykład: występowanie stref zabrudzeniowych uniemożliwiających eksploatację linii napowietrznych, względy urbanistyczne i estetyczne w obszarach zamieszkałych (przede wszystkim miejskich) czy konieczność przekraczania dużych zbiorników wodnych, jak kanały, zatoki morskie czy morza.

Elektroenergetyczna linia kablowa wykonywana jest kablem wielożyłowym (trójfazowym) lub składa się z wiązki kabli jednożyłowych. Kable elektroenergetyczne mają złożoną budowę ze względu na znaczne napięcia dielektryczne oraz trudne warunki pracy. Układ izolacyjny kabla musi wytrzymywać narażenia napięciowe przez cały okres eksploatacji (nawet kilkadziesiąt lat), a powłoki i pancerz zewnętrzny muszą chronić kabel przed narażeniami mechanicznymi, wnikaniem wilgoci, a czasem przed agresywnymi substancjami chemicznymi.

Układy izolacyjne kabli wykonywane są z papieru nasyczonego syciwem izolacyjnym lub poprzez wytłaczanie na żyłe materiału termoplastycznego (polwinitu albo polietylenu). Kable z izolacją celulozową (papierową) produkowane są w całym zakresie napięć znamionowych, lecz obecnie wypierane są przez konstrukcje z izolacją z tworzyw sztucznych. Decyduje o tym głównie skomplikowany i czasochłonny proces produkcji z izolacją papierową nasycaną. Izolację polwinitową (PCV), ze względu na własności elektryczne, stosuje się wyłącznie w kablach na napięcie znamionowe nieprzekraczające 6 kV. Natomiast w kablach wyższych napięć izolację wykonuje się z polietylenu usieciowanego (XLPE). Materiał ten charakteryzuje się mniejszą przenikalnością elektryczną i nie ulega degradacji podczas długotrwałego narażenia na silne pole elektryczne.

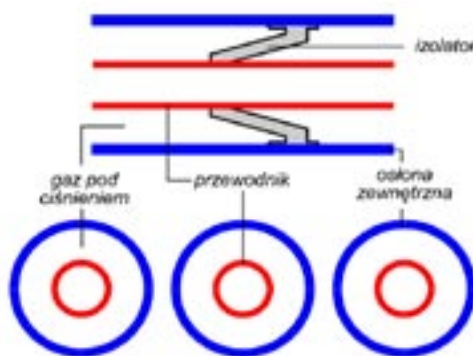
Linie kablowe budowane są na napięcia znamionowe nieprzekraczające wartości około 500 kV. Mogą być układane bezpośrednio w ziemi lub w specjalnie przygotowanych kanałach kablowych. Przykładowy widok dwutorowej linii kablowej 400 kV o mocy przesyłowej 1100 MVA ułożonej pod centrum Berlina przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Dwutorowa linia kablowa 400 kV o mocy przesyłowej 1100 MVA

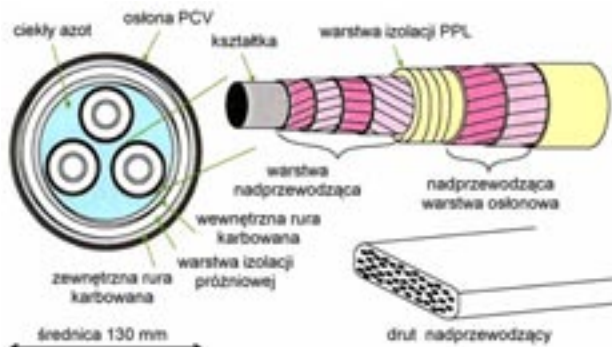
Rozwój nowoczesnych technologii umożliwił budowę linii kablowych o niekonwencjonalnej konstrukcji. Powstały linie, w których izolację stałą zastąpiono gazem izolacyjnym pod ciśnieniem. Obecnie na świecie pracuje ponad 300 km linii kablowych, w których medium izolującym jest sześćfluorek

siarki (SF_6). Pracują one na napięciu od 72 kV do 550 kV. Przykładową budowę linii gazowej przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. System GIL (ang. Gas Insulated Line)

Inną ciekawą konstrukcją jest linia kablowa z żyłami nadprzewodzącymi – rysunek 11. Jednak na obecnym poziomie technologicznym linie elektroenergetyczne ułożone kablami nadprzewodzącymi – pomimo bardzo dużych zdolności przesyłowych – mogą być tylko liniami bardzo krótkim. Ponadto, ze względu na konieczność zapewnienia niskiej temperatury – są to instalacje bardzo kosztowne.



Rys. 11. Kabel nadprzewodzący

Pomimo niewątpliwych zalet linii kablowych, na drodze szerszego ich zastosowania stoją wysokie koszty budowy. Stosunek kosztów budowy linii kablowej i linii napowietrznej o napięciu 110÷220 kV zawiera się w przedziale od 3 do 8, a linii o napięciu rzędu 400 kV od 8 do nawet 25. Pomimo tak znacznych kosztów, linie kablowe wysokich i najwyższych napięć stanowią jedyną możliwość zasilania centrów dynamicznie rozwijających się aglomeracji miejskich.

Stacja elektroenergetyczna (rys. 12) jest zespołem urządzeń służących do rozdzielania albo przetwarzania energii elektrycznej, znajdujących się we wspólnym, wydzielonym pomieszczeniu lub na wydzielonym terenie, albo umieszczonych na wspólnej konstrukcji wsporczej. W skład wyposażenia stacji elektroenergetycznej wchodzi: transformatory energetyczne, aparatura łączeniowa (włączniki, rozłączniki i odłączniki) oraz aparatura ochronno-pomiarowa (przekładniki prądowe i napięciowe, ograniczniki przepięć i uziemniki).



Rys. 12. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne stacji elektroenergetycznych

Stacje elektroenergetyczne posiadają bardzo zróżnicowaną budowę, co jest podyktowane optymalizacją rozwiązania techniczno-ekonomicznego. Przy projektowaniu i wyborze rozwiązania konstrukcyjnego stacji brane są pod uwagę względy inwestycyjne oraz eksploatacyjne. Należą do nich między innymi: liczba instalowanych aparatów rozdzielczych, zajmowany teren, możliwość etapowej budowy, niezawodność, elastyczność oraz wymagania wynikające z roli danej stacji w sieci. Obecnie, stacje elektroenergetyczne są budowane jako rozwiązania konwencjonalne (otwarte), w których izolację stanowi powietrze pod ciśnieniem atmosferycznym oraz gazowe (osłonięte), w których izolację stanowi SF_6 pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego (rys. 13).



Rys. 13. Widok rozdzielni gazowej

Rozdzielnie elektroenergetyczne konwencjonalne budowane są obecnie na obszarach pozamiejskich. W porównaniu z rozdzielnicami gazowymi charakteryzują się: 10–15 razy większą zajętością terenu przy tych samych parametrach technicznych, znacznie dłuższym czasem montażu, większym zużyciem materiałów konstrukcyjnych, większą zawodnością i awaryjnością, większym wpływem na środowisko naturalne (pole elektromagnetyczne, hałas), ale również zdecydowanie niższą ceną. Rozdzielnie elektroenergetyczne gazowe – budowane są głównie jako wewnętrzne i znajdują zastosowanie przede wszystkim: w stacjach miejskich – gdzie teren zwykle jest ograniczony i drogi, a względy architektoniczne odgrywają istotną rolę, przemysłowych – gdy brakuje miejsca do rozbudowy stacji, budowanych na terenie o dużym zanieczyszczeniu atmosfery, w elektrowniach jądrowych – ze względu na wymaganą dużą niezawodność pracy oraz małą pracochłonność obsługi. Przykład lokalizacji stacji wewnętrznej gazowej w warunkach miejskich przedstawiono na rysunku 14.

Współczesna stacja elektroenergetyczna w swych rozwiązaniach musi uwzględniać także ograniczanie kosztów. Uzyskuje się ją poprzez: ograniczenie powierzchni terenów zajmowanych przez stację energetyczną, rozwiązania modułowe redukujące do niezbędnego minimum prace montażowe na

obiekcie, rozwiązania kompaktowe wymagające mniejszej ilości fundamentów i konstrukcji wsporczych, utrzymanie ciągłości dostawy energii elektrycznej, decyzje o zabiegach konserwacyjnych w oparciu o ciągły monitoring urządzeń oraz analizę aktualnego stanu i poziomu ryzyka.

Dążenie do zmniejszenia wymiarów stacji zainspirowało konstruktorów do opracowania rozdzielnic modułowych, które zajmują obszar o 30–50% mniejszy niż rozdzielnice napowietrzne konwencjonalne. Kompresję tych rozwiązań uzyskuje się poprzez zintegrowaniu funkcji spełnianych przez kilka aparatów a jednym rozwiązaniu konstrukcyjnym.

Stacje elektroenergetyczne z rozdzielnicami modułowymi w porównaniu z rozwiązaniami tradycyjnymi wymagają mniejszej liczby odłączników, fundamentów, konstrukcji wsporczych i połączeń elektrycznych, mają krótszy czas montażu, mają niższe koszty eksploatacji oraz zapewniają większe bezpieczeństwo obsługi dzięki redukcji ilości przeglądów i konserwacji.

Jednym z wyzwań dla energetyki, w aspekcie technicznym, jest bezpieczeństwo energetyczne zdefiniowane w „Prawie energetycznym”, jako *stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy zachowaniu wymagań ochrony środowiska*. Definicja ta została powtórzona w „Założeniach polityki energetycznej Polski do 2020 roku”. Przyjmując za podstawę tę ustawową definicję, można określić zachowanie bezpieczeństwa energetycznego kraju jako zespół działań zmierzających do stworzenia takiego systemu prawno-ekonomicznego, który wymuszałby pewność dostaw, konkurencyjność i spełnienie wymogów ochrony środowiska. Pewność dostaw należy tutaj rozumieć jako zapewnienie stabilnych warunków, umożliwiających pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania gospodarki i społeczeństwa na energię odpowiedniego rodzaju i wymaganej jakości, realizowanych przez dywersyfikację kierunków dostaw oraz rodzajów nośników energii pozwalającej na ich wzajemną substytucję.

Pewność dostaw jest dzisiaj oceniana jako jakość zasilania energią elektryczną będącą sumą jakości energii elektrycznej i niezawodności zasilania. Problem jakości zasilania odbiorców w energię elektryczną można podzielić na trzy zagadnienia:



Rys. 14. Podziemna stacja wewnętrzna gazowa zlokalizowana w centrum miasta

- jakość dostarczanej energii elektrycznej (jakość napięcia),
- niezawodność dostawy energii elektrycznej (niezawodność zasilania),
- jakość obsługi odbiorcy (klienta).

Zgodnie z rozporządzeniem „przyłączeniowym” jakość energii elektrycznej jest identyfikowana przez parametry napięcia: częstotliwość, poziom napięcia, kształt krzywej. Ponadto w normach przedmiotowych definiuje się i opisuje charakterystyki napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, dotyczące: częstotliwości, wartości, kształtu przebiegu czasowego, symetrii napięć w układzie trójfazowym.

Niezawodność systemu elektroenergetycznego jest określana przez jego zdolność do zapewnienia zasilania odbiorców energią elektryczną o odpowiedniej jakości w określonym czasie. Niezawodność wyraża się liczbowo jako prawdopodobieństwo poprawnego spełnienia wymienionych funkcji. Niezawodność zatem w dziedzinie techniki jest kategorią probabilistyczną i jest określana przez różnego rodzaju wskaźniki probabilistyczne.

W praktyce niezawodność systemu elektroenergetycznego w znacznym stopniu sprowadza się do bezprzerwowego zasilania odbiorców w energię elektryczną odpowiedniej jakości, które wymaga spełnienia różnorodnych wymagań jakościowych. Dotyczą one projektowania, wytwarzania, eksploatacji i likwidacji poszczególnych elementów składowych urządzeń elektroenergetycznych. *PSE-Operator S.A.* podaje informację o ciągłości i niezawodności dostaw energii elektrycznej do odbiorców końcowych przyłączonych bezpośrednio do sieci przesyłowej (220 kV) w postaci dwóch wskaźników:

- *ENS* (ang. *Energy Not Supplied*) – wskaźnik dotyczący ilości energii elektrycznej niedostarczonej łącznie do odbiorców końcowych przyłączonych do sieci przesyłowej w miejscach dostarczania, na skutek przerw w dostawach (awaryjnych i planowych), wyrażony w MWh,
- *AIT* (ang. *Average Interruption Time*) – wskaźnik dotyczący średniego czasu przerwy w dostarczaniu energii elektrycznej do odbiorców końcowych przyłączonych do sieci przesyłowej w miejscach dostarczania, w przeliczeniu na 1 MW średniej mocy dostarczonej łącznie do tych odbiorców w ciągu roku, wyrażony w minutach.

Tab. 2. Wartości wskaźników zasilania odbiorów energii elektrycznej przyłączonych do sieci 220 kV (źródło *PSE Operator S.A.*)

		ROK		
		2005	2006	2007
ENS	[MWh]	125,20	111,61	79,16
ATI	[min]	28,39	24,71	17,40

Ze względu na ograniczoną niezawodność elementów składowych układów/installacji, a więc również całego systemu elektrycznego mogą zdarzyć się awarie. Wielkie, rozległe awarie systemowe katastrofalne w skutkach, zwane z języka angielskiego jako *blackout*, skutkują pozbawieniem zasilania w energię elektryczną, czasami wiele milionów ludzi. Awarie te często inicjowane są przez pojedyncze, z pozoru nieistotne zdarzenie. Przyczyny tkwią często wewnątrz systemu dotkniętego awarią (w sterowaniu pracą systemu). Dlatego tak istotnym elementem systemu elektroenergetycznego jest układ sterowania jego pracą, w tym operatorzy, od których zależy stan pracy systemu jako całości. Ogromna złożoność i wielopostaciowość, opartych na prawach fizyki, stanów połączonych systemów elektroenergetycznych stwarza niekiedy nieoczekiwane i nieprzewidywalne sytuacje, na które nie jest przygotowany układ sterowania.

Największa awaria systemowa miała miejsce w północno-wschodnich stanach USA i Kanadyjskich prowincjach Ontario i Quebec 14 sierpnia 2003 r. Czas trwania *blackout'u* wyniósł 29 godzin i obejmował 8 stanów USA i 2 prowincje Kanady. Około 60 milionów ludzi została pozbawiona elektryczności. Wśród przyczyn tej awarii wyodrębniono trzy grupy. Pierwsza z nich dotyczy niewłaściwych działań operacyjnych ze strony FirstEnergy – operatora obszaru regulacyjnego, w którym rozwinęła się awaria. Druga grupa przyczyn awarii dotyczy zarządzania majątkiem sieciowym w FirstEnergy. Ostatnia grupa przyczyn obejmowała nieskuteczną działalność diagnostyczną koordynatorów niezawodności dla terenu, na którym wystąpiły zdarzenia inicjujące. W tym samym roku również w Europie miały miejsce największe awarie systemowe ostatnich lat.

Wnioski powstałe po analizie awarii i ich przyczyn w znacznym stopniu nakreśliły wyzwania dla energetyki w najbliższych latach, zwłaszcza poprzez:

- wprowadzenie audytów niezawodności w odniesieniu do operatorów obszarów regulacyjnych i koordynatorów niezawodności
- udoskonalenie systemów zabezpieczeń ograniczających lub opóźniających wyłączenia kaskadowe,
- rozwój systemów diagnostycznych i systemów zarządzania majątkiem sieciowym w czasie rzeczywistym,
- opracowanie wytycznych dla narzędzi czasu rzeczywistego wspomagających pracę służb dyspozytorskich.

Jednym ze sposobów zwiększenia niezawodności zasilania jest rozwój energetyki rozproszonej poprzez dywersyfikację mocy systemu i lokalizację źródeł wytwarzania energii elektrycznej blisko miejsca jej odbioru. W przypadku energetyki rozproszonej rola Operatora Sieci Przesyłowej sprowadza się tylko do bilansowania i zabezpieczenia dostaw energii. Przez źródło wytwarzania energii należy rozumieć, w przypadku generacji rozproszonej, źródło pozwalające generować moc rzędu 1 kW do 5 MW. Do źródeł tych zalicza się agregaty, małe turbiny, ogniwa fotowoltaiczne, ogniwa paliwowe, farmy wiatrakowe. Duże znaczenie dla rozwoju generacji rozproszonej ma możliwość wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

Brak ukierunkowania rozwoju energetyki rozproszonej na niezawodność zasilania już na etapie projektowym może doprowadzić do sytuacji jaka miała w Danii, 23 września 2003 r., gdzie przy odbudowie systemu wschodniej Danii całkowicie nieprzydatne okazały się być źródła rozproszone (farmy wiatrowe i małe elektrociepłownie), które stanowią znaczącą część mocy wytwórczych tego systemu (pokrywały prawie 30% obciążenia w dniu awarii).

Autorzy mają nadzieję, że przedstawione aspekty techniczne wyzwań stawianych elektroenergetyce, przybliżyły Czytelnikowi niniejszego artykułu jej kierunki rozwoju i wagę problematyki. Jednak oprócz wymagań technicznych, systemy elektroenergetyczne podlegają również ocenie ekonomicznej. Wyznacznikiem efektywności całego systemu – od kosztów i jakości paliwa, poprzez koszt wytworzenia energii elektrycznej do jej przesyłu – jest jej cena końcowa ponoszona przez odbiorców oraz cena, jaką za uprzemysłowienia życia człowieka płaci środowisko...

✉ dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. nz. AGH
dr hab. inż. Wiesław Nowak
dr inż. Szczepan Moskwa
dr inż. Rafał Tarko

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki Wydział EAIiE AGH