

Efekty jakościowe zastosowania kondensatorów jako elementów wzmacniających stabilność napięciową sieci przesyłowych

Ryszard Marcińczak, Andrzej Iwaniak, Przemysław Chojnowski

Polski elektroenergetyczny system przesyłowy (SEE) jest złożonym układem regulacji wieloparametrowej. W procesie regulacji napięcia i rozplywu mocy biernej nadrzędnym celem jest spełnienie warunku $U_{min} < U < U_{max}$ w każdym punkcie sieci oraz ograniczenie przepływu mocy biernej w liniach międzysystemowych w określonych wąskich granicach.

Cel nadrzędny może być osiągnięty przez sterowanie wielu parametrów wejściowych, przy czym muszą być spełnione następujące warunki podstawowe:

- w dowolnym punkcie SEE napięcie nie może przekraczać dopuszczalnych wartości granicznych,
- prądy wszystkich elementów systemu muszą być mniejsze od dopuszczalnych prądów obciążalności długotrwałej,
- liczba przełączeń i zakres zmian przekładni transformatorów systemowych nie mogą w ciągu doby przekroczyć zadanych wartości,
- kąty mocy oraz moce bierne generowane w generatorach synchronicznych nie mogą przekroczyć wartości granicznych.

Sterowane elementy systemu elektroenergetycznego można podzielić na następujące grupy:

Grupa I

- Główne duże węzły wytwórcze, wprowadzające energię do sieci 400 i 220 kV, mające decydujący wpływ na pracę systemu, niezależnie od ich usytuowania geograficznego i powiązań elektrycznych. Do węzłów tych należą duże elektrownie kondensacyjne opalane węglem kamiennym i brunatnym.
- Elektrownie szczytowo-pompowe, ze względu na możliwość ich wykorzystania jako źródeł zasilania szczytowego lub interwencyjnego.
- Węzły elektroenergetyczne z regulowanymi (pod obciążeniem) transformatorami 400/220 kV.
- Dławiki kompensacyjne przewidywane do zastosowania w węzłach długich ciągów przesyłowych 400 kV (w polskim systemie jeszcze nie stosowane).
- Linie przesyłowe 220 i 400 kV, ze względu na możliwość zmian ich konfiguracji.

Grupa II

- Węzły wytwórcze wyprowadzające energię do sieci 110 kV, w tym duże elektrociepłownie zawodowe i duże elektrownie wodne.
- Węzły elektroenergetyczne z regulowanymi (pod obciążeniem) transformatorami 400/110 kV.
- Nieliczne (w Polsce) baterie kondensatorów w węzłach 110 kV.

Grupa III (elementy o niewielkim znaczeniu dla systemu)

- Elektrownie i elektrociepłownie zawodowe i przemysłowe oraz małe elektrownie wodne współpracujące z sieciami odbiorczymi średniego napięcia.
- Węzły elektroenergetyczne z regulowanymi pod obciążeniem transformatorami 110 kV/SN.
- Baterie kondensatorów włączone do sieci SN i NN.

Regulacja realizowana jest za pomocą:

- regulatorów napięcia generatorów (utrzymują zadaną wartość napięcia generatora, oddziałując na poziom prądu wzbudzenia),
- regulatorów grupowych typu ARNE (utrzymują zadane wartości napięcia w rozdzielniach elektrowni NN, oddziałując na regulatory napięcia poszczególnych generatorów),
- statycznych źródeł mocy biernej, np. dławiki oraz baterie kondensatorów, a także układy energoelektroniczne,
- linii przesyłowych NN, jako szczególnych źródeł mocy biernej (regulacja skokowa – wyłączanie linii),
- przełączników zaczepów transformatorów 400/220, 400/110, 220/110 kV.

Przesył mocy biernej i czynnej w systemie elektroenergetycznym opiera się na trzech prostych zależnościach, opisujących przepustowość systemu, poziom napięcia i straty mocy:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (1)$$

gdzie: P – moc czynna, Q – moc bierna, I – prąd, U – napięcie sieciowe

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \quad (2)$$

gdzie: R – rezystancja linii, X – reaktancja

$$\Delta P = 3 \left(\frac{S}{\sqrt{3}U} \right)^2 R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R \quad (3)$$

Mgr inż. Ryszard Marcińczak – PSE Operator SA
dr inż. Andrzej Iwaniak – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
dr inż. Przemysław Chojnowski – PBW OLMEX SA, Wójtowo

W sieciach najwyższych napięć reaktancja zastępcza X dla podstawowej harmonicznej jest wielokrotnie większa od rezystancji, stąd przy różnicy napięć szczególnie istotny będzie przepływ mocy bierniej

$$\Delta U = \frac{Q \cdot X}{U} \quad (4)$$

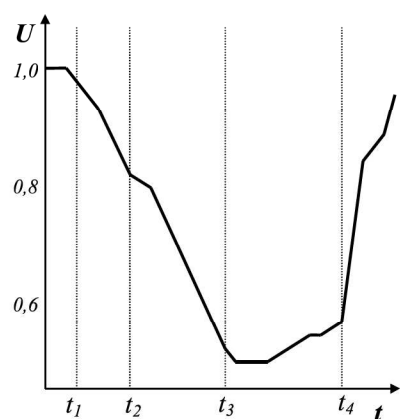
Przepływ mocy bierniej Q wywołuje straty mocy czynnej na rezystancji zastępczej linii R , równe

$$\Delta P = \frac{Q^2}{U^2} R \quad (5)$$

Straty te są zależne od kwadratu mocy bierniej, więc ze wzrostem spadku napięcia szybko wzrastają.

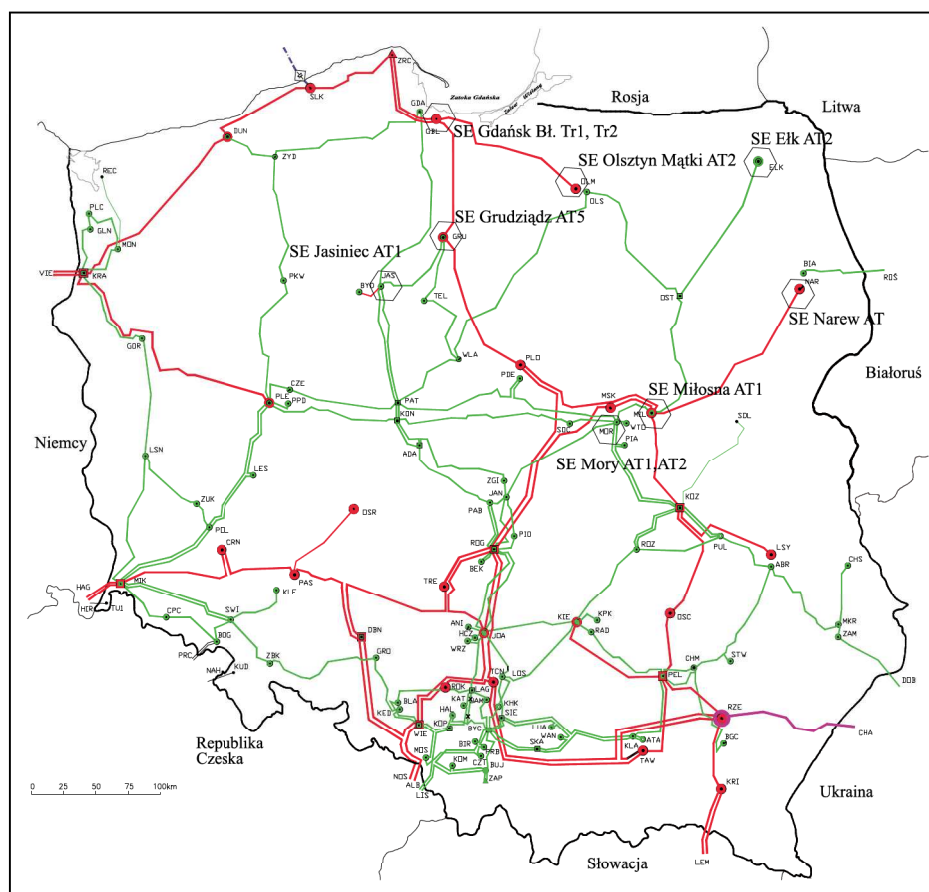
Brak możliwości wyrównania zapotrzebowania na moc bierną powoduje powstanie lawiny napięciowej i konieczność odłączenia całego regionu energetycznego, powodując długotrwałą przerwę w dostawie energii elektrycznej. Zjawisko lawiny napięciowej jest konsekwencją braku odpowiedzi ze strony systemu energetycznego na omawiany przypadek. Odbudowa napięcia może nastąpić po zmniejszeniu obciążenia sieci przez odłączenie linii lub zadziałaniu automatycznej regulacji napięcia, zmianie napięcia generatora, zmianie kąta wirnika, zwiększeniu mocy bierniej kompensatorów statycznych, czyli zwiększeniu produkcji mocy bierniej.

Lawina napięciowa jest zjawiskiem dobrze opisanym, którego przykładową charakterystykę czasową przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Charakterystyka czasowa zjawiska lawiny napięciowej
 $0-t_1$ – dynamiczne oddziaływania odbiorów
 t_1-t_2 – oddziaływania regulacji przekładni
 t_2-t_3 – lawina napięcia w węzłach odbiorczych
 t_3-t_4 – odbudowa napięcia poprzez wyłączenie odbiorów

Rys. 2. Lokalizacja baterii kondensatorowych w poszczególnych stacjach energetycznych



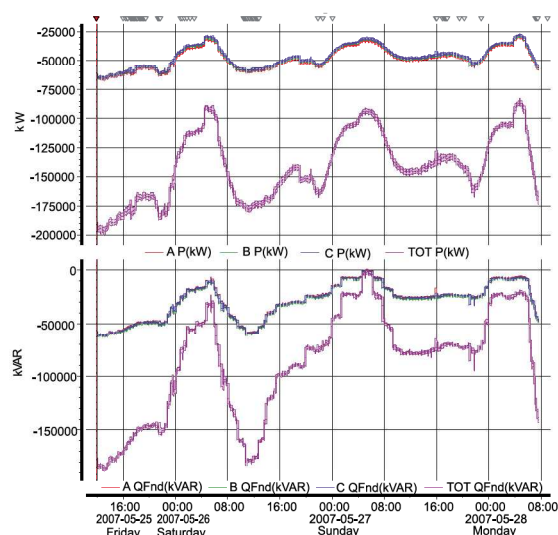
W jej przebiegu czasowym można wyróżnić kilka charakterystycznych okresów:

- Czas od 0 do t_1 . W przypadku zwarcia, gdy mamy do czynienia ze stanem podprzebiegowym, nie działa układ regulacji napięcia generatora, stąd napięcie na zaciskach generatora znacznie się obniża – nawet powyżej 20%.
- Czas od t_1 do t_2 . Działa układ automatycznej regulacji napięcia generatora i jeżeli nie są naruszone ograniczenia mocy bierniej generatora, napięcie na jego zaciskach jest równe napięciu w stanie przedzakłóceniovym.
- Czas od t_2 do t_3 . Działa regulacja pierwotna częstotliwości, załączane są dodatkowe baterie kondensatorów, mające zapobiec obniżaniu się napięcia.
- Czas od t_3 do t_4 . Działa automatyczna regulacja przekładni transformatorów pod obciążeniem.
- Czas powyżej t_4 . Zmiana konfiguracji sieci, odłączenia niektórych odbiorów.

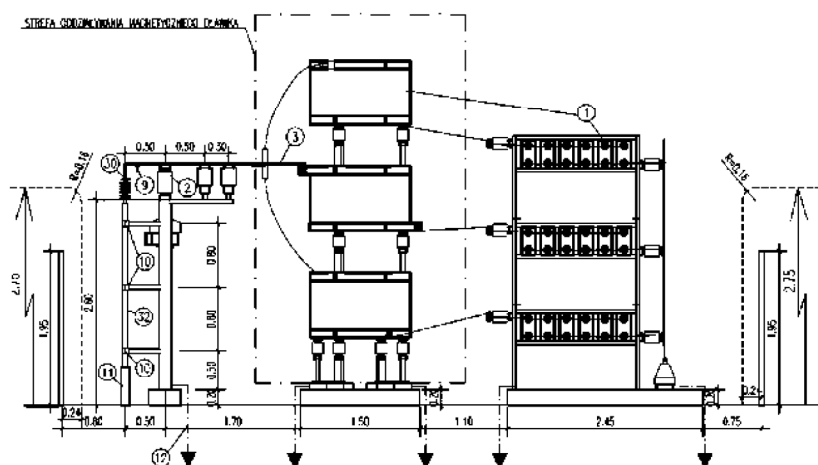
Urządzenia kompensujące w postaci statycznych baterii kondensatorów mogą wspomagać produkcję prądu biernego w momentach kryzysowych, nie ograniczając wydajności generatorów. Wyposażone w układy pomiarowo-regulacyjne o dużej szybkości działania (krótki czas reakcji) są w stanie w krótkim czasie wyrównywać straty liniowe. Budowane w układzie filtra wyższych harmonicznych mogą wpływać na poprawę jakości energii elektrycznej, redukując poziom odkształcenia napięcia w punkcie ich przyłączenia.



Rys. 3. Bateria kondensatorowa 60 Mvar/15 kV, z szeregowym dławikiem odstrajającym



Rys. 6. Przebieg czasowy zmian mocy czynnej i bierniej autotransformatora ATR 1 – Gdańsk Błonie



Rys. 4. Stanowisko baterii kondensatorów w stacji 220/110 kV Elk

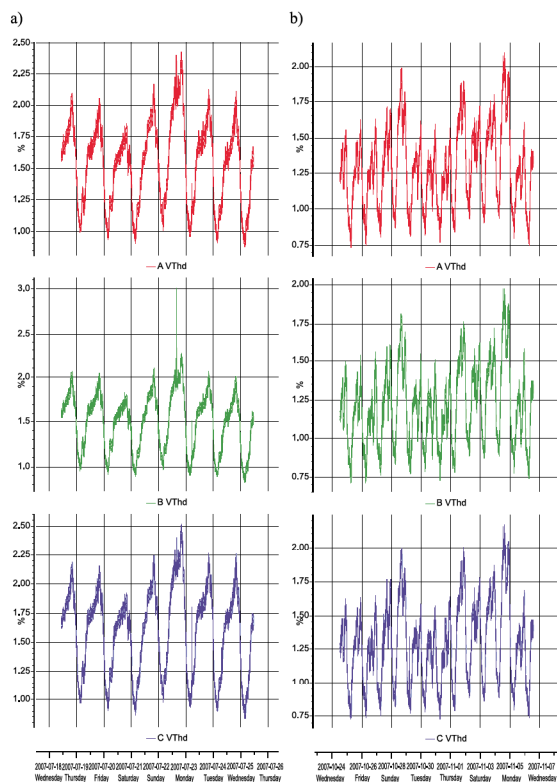
Zestawienie mocy baterii kondensatorów na poszczególnych stacjach elektroenergetycznych

Stacja	Moc baterii [Mvar]	Napięcie baterii [kV]
400/110 kV Gdańsk Błonie	2 × 25	30
220/110 kV Elk	3 × 15	15
400/220/110 kV Grudziądz Węgrowo	4 × 15	15
220/110 kV Jasieniec	3 × 15	15
400/220 kV Miłosna	3 × 15	15
220/110 kV Mory	2 × (1 × 15)	15
400/220/110 kV Olsztyn Mątki	4 × 15	15

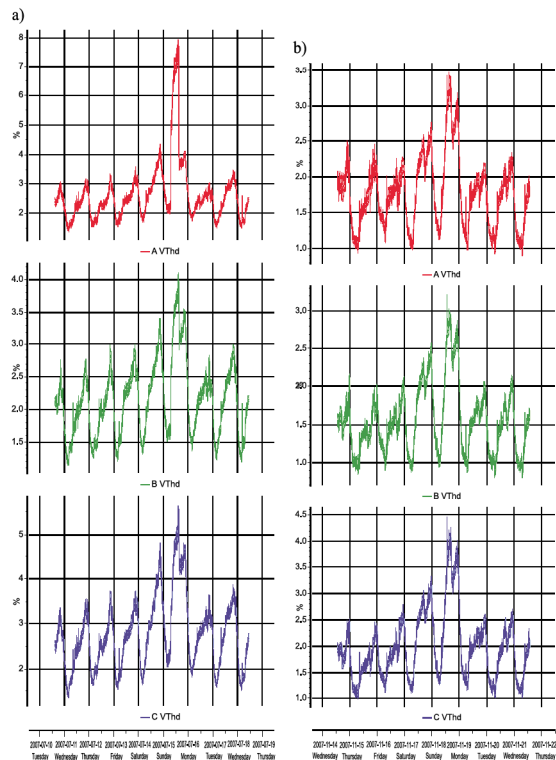


Obserwowane ostatnio duże zainteresowanie problematyką mocy bierniej w sieciach najwyższych napięć ma swoją genezę w powstaniu lawiny napięciowej w Polsce północno-wschodniej w czerwcu 2006 roku. Od 2007 roku instalowane są baterie dużej mocy w sieciach wysokich napięć (rys. 2), aby umożliwić zmniejszenie deficytu mocy bierniej i zwiększyć możliwości poprawy stabilności napięciowej sieci o ważny element, jakim są baterie kondensatorowe. W bilansie mocy bierniej SEE baterie kondensatorowe mają zaledwie 10% udziału urządzeń decydujących o globalnej strukturze mocy bierniej. W ostatnim czasie do poprawy stabilności napięciowej sieci zostały zainstalowane w siedmiu stacjach NN/WN (tab.) baterie kondensatorowe w układzie z szeregowym dławikiem odstrajającym o częstotliwości rezonansowej 189 Hz. Przykładowy widok baterii kondensatorów przedstawiają rysunki 3, 4 i 5.

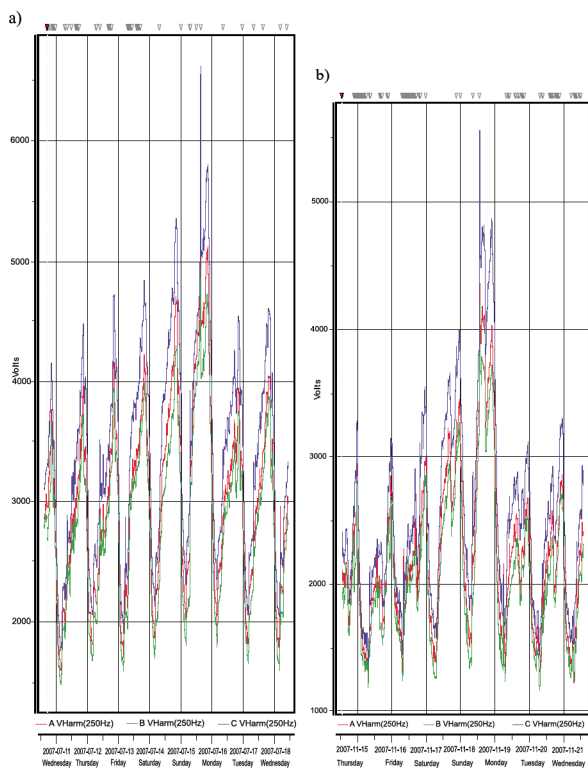
▶ Rys. 5. Bateria kondensatorowa 50 Mvar/30 kV z szeregowym dławikiem odstrajającym $p = 7\%$, SE Gdańsk Błonie



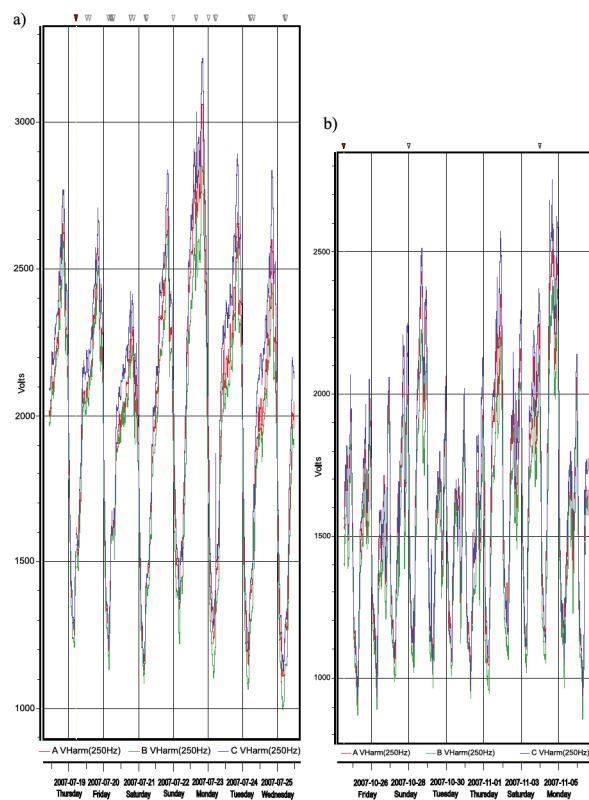
Rys. 7. Całkowity współczynnik odkształcenia napięcia THDU – Stacja Warszawa Mory:
a) przed montażem baterii, b) po montażu baterii



Rys. 8. Całkowity współczynnik odkształcenia napięcia THDU – Stacja Warszawa Miłosna:
a) przed montażem baterii, b) po montażu baterii



Rys. 9. Napięcie 5. harmonicznej – Stacja Warszawa Miłosna:
a) przed montażem baterii, b) po montażu baterii



Rys. 10. Napięcie 5. harmonicznej – Stacja Warszawa Mory:
a) przed montażem baterii, b) po montażu baterii

Dobór baterii kondensatorowych oparty był na faktycznym zapotrzebowaniu na moc bierną. Wybór częstotliwości rezonansowej (189 Hz) obwodu szeregowego LC wynikał z obrazu widma wyższych harmonicznych w napięciu i prądzie. Po zainstalowaniu baterii zauważono istotną poprawę THD napięcia po stronie wysokiej autotransformatorów, przy zdecydowanej mniejszej wartości 5. harmonicznej.

Na rysunku 6 przedstawiono wykresy obciążenia autotransformatora mocą bierną i czynną, a na rysunkach 7 i 8 – wartości THD w napięciu po stronie wysokiej autotransformatorów przed i po montażu baterii kondensatorowych. Podobnie na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wartości napięcia 5. harmonicznej. Przesunięcie wykresów wykonano z uwagi na konieczność porównania przy podobnych wartościach skali napięcia.

Wnioski

Zastosowanie baterii kondensatorowych przyczyniło się do obniżenia deficytu mocy biernej i pozwoliło na wprowadzenie do systemu elektroenergetycznego ważnego elementu regulacyjnego, pozwalającego na szybkie wyrównywanie zapotrzebowania na moc

bierną, oraz zmniejszyło straty przesyłowe. Dodatkowym efektem jest obniżenie poziomu odkształcenia napięcia w efekcie częściowej filtracji przez baterie kondensatorów z dławikami odstrajającymi 5. harmonicznej prądu.

LITERATURA

- [1] Kremens Z., Sobierajski Z.: Analiza systemów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1996
- [2] Kulczycki J.: Techniczne aspekty przesyłu mocy biernej w sieciach wysokich napięć. Konferencja „Kompensacja mocy biernej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych SN i WN jako jedna z metod ograniczania strat przesyłowych”, Olaszyn – Warszawa 2006
- [3] Hellman W., Szczerba Z.: Regulacja częstotliwości i napięcia w SEE. WNT, Warszawa 1978
- [4] Jasicki Z. i in.: Praca układów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1965
- [5] Bernas S.: Systemy elektroenergetyczne. WNT, Warszawa 1986
- [6] Poradnik Inżyniera Elektryka. WNT, Warszawa 1997
- [7] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców
- [8] Gosztowt W.: Gospodarka elektroenergetyczna w przemyśle. WNT, Warszawa 1971



Konferencja Naukowo-Techniczna

Problemy projektowania
i budowy systemu zasilania
sieci trakcyjnej
Kolei Dużych Prędkości

**Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Oddział Wrocławski**

zaprasza na

Międzynarodową Konferencję Naukowo-Techniczną



PROBLEMY PROJEKTOWANIA I BUDOWY SYSTEMU ZASILANIA SIECI TRAKCYJNEJ KOLEI DUŻYCH PRĘDKOŚCI

Krzyżowa, 19 – 21 listopada 2009 r.

Tematyka Konferencji

- układy zasilania trakcji elektrycznej – rys historyczny
- zasilanie trakcji elektrycznej systemem 2×25 kV AC
- sieci trakcyjne dla prędkości $V \geq 350$ km/h,
- oddziaływanie układów zasilania trakcji elektrycznej napięciem 2×25 kV na system elektroenergetyczny
- uwarunkowania stawiane systemowi elektroenergetycznemu przez układ zasilania trakcji elektrycznej przy eksploatacji kolei dużych prędkości,
- bilansowania energii elektrycznej dla potrzeb zasilania kolei dużych prędkości
- sterowanie przepływem energii i regulacja napięcia
- jakość energii elektrycznej oraz diagnostyka zakłóceń w sieci zasilającej
- metody analizy stanów przejściowych w sieciach i układach zasilających
- ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym
- ochrona przepięciowa i odgromowa
- układy zabezpieczeń automatyki systemowej
- tabor kolei dużych prędkości
- specyfikacje techniczne interoperacyjności (TSI)

Współorganizatorzy

Politechnika Warszawska,
Politechnika Wrocławska,
Arcadis Sp. z o.o., PKP Energetyka SA

Adres Komitetu Organizacyjnego

Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Oddział Wrocławski
ul. Piłsudskiego 74, 50-020 Wrocław
tel./fax (071) 343-66-41, tel. (071) 78-18-502
e-mail: sep.wroc@post.pl, www.sep.wroc.pl

Patronat Honorowy Konferencji:

Minister Infrastruktury
– Pan Cezary Grabarczyk
Marszałek Województwa Dolnośląskiego
– Pan Marek Łapiński
Prezes Zarządu PKP Energetyka SA
– Pan Tadeusz Skobel
Prezes Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe SA
– Pan Zbigniew Szafranski

www.kdp2009.pl