

Smart Grid – sieć przyszłości

Wiesław Kopterski

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

Rozwój sieci elektroenergetycznej w głównej mierze zależy od nowych rozwiązań technicznych. Smart Grid – inteligentna, wielofunkcyjna sieć przesyłowa przyszłości – to narzędzie efektywniejszego wykorzystania coraz droższych surowców energetycznych. Na powszechnym wdrożeniu inteligentnych sieci zyskają indywidualni odbiorcy, krajowe gospodarki i środowisko naturalne. Europa dąży dziś do wzrostu efektywności energetycznej oraz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Smart Grid to wyzwanie, które dąży do tego ambitnego celu. W artykule przedstawiono ideę inteligentnych sieci, które pomogą przedsiębiorstwom energetycznym w zwiększeniu niezawodności dostaw energii i wydajności operacyjnej, rozszerzeniu zakresu pomiarów i kontroli sieci energetycznych oraz w zarządzaniu nowymi technologiami nawet w najdalszych punktach sieci energetycznej.

Słowa kluczowe: smart grid, nowe technologie, energia elektryczna, źródła odnawialne

W dzisiejszych czasach świat boryka się z wieloma problemami, do których należą m.in. ograniczone zasoby surowców naturalnych, problemy energetyczne i ekologiczne. Zmiany klimatu są faktem i mają wpływ na wiele dziedzin życia. Nie ulega wątpliwości, że łagodzenie zmian klimatu przez redukcję emisji CO₂ prowadzi do nowej transformacji ekonomicznej i politycznej w skali światowej. Proces ten wymaga nieustannego poszukiwania nowych sposobów myślenia, komunikowania, jak również angażowania opinii publicznej.

Pojawiają się zatem wyzwania dotyczące bardziej efektywnego niż dotąd wytwarzania, przesyłania i wykorzystania energii elektrycznej. Coraz większe znaczenie w pokrywaniu zapotrzebowania na energię zyskują źródła odnawialne, takie jak elektrownie wodne, wiatrowe i słoneczne. Moce tych elektrowni, które pracują na sieć dystrybucyjną wysokich i średnich napięć, oscylują w granicach od kilkudziesięciu kilowatów do kilkuset megawatów. Zmiany te wymuszają konieczność skuteczniejszego zarządzania pracą nie tylko sieci SN, ale również NN (rys. 1).

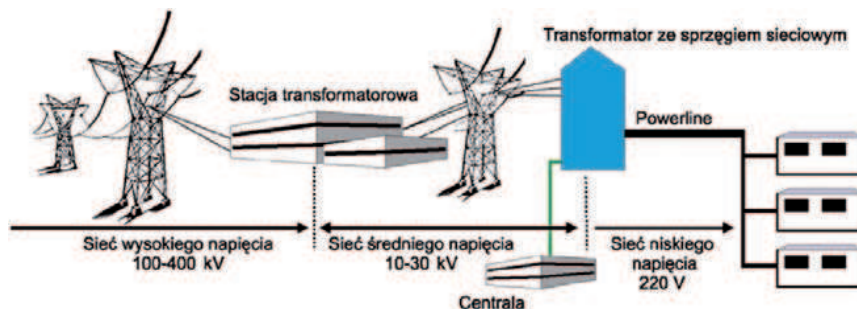
Źródła odnawialne, zwłaszcza wiatrowe i solarne, pracują jedynie w sprzyjających warunkach atmosferycznych (odpowiednia siła wiatru, nasłonecznienie) i choć pełnią coraz ważniejszą rolę w zastępowaniu elektrowni systemowych, nie są w pełni dyspozycyjne w tradycyjnym znaczeniu. Wymagają uruchamiania i efektywnego sterowania w czasie rzeczywistym źródeł rezerwujących w szczytach zapotrzebowania oraz możliwości sterowania poborem w dolinach zapotrzebowania na energię elektryczną. Dyrektywy Unii Europejskiej oraz

działania rządów dotyczące zwiększenia niezawodności sieci energetycznych, przechodzenie na rozproszone wytwarzanie energii, jak również coraz szersze zastosowanie odnawialnych źródeł energii wpływają na zmiany dotyczące dynamiki generowania i konsumpcji energii elektrycznej. Dlatego przedsiębiorstwa wprowadzają nowoczesne technologie umożliwiające dynamiczne zarządzanie sieciami przesyłowymi i dystrybucyjnymi za pomocą punktów pomiarowych i kontrolnych rozmieszczonych na wielu węzłach i łączach, które stanowią podstawę inteligentnych systemów, określanymi jako Smart Grid.

Smart Grid

Smart Grid to inteligentna sieć elektroenergetyczna, która skutecznie reaguje na zachowania wszystkich przyłączonych podmiotów (wytwórca, odbiorca/prosument, operator sieci), a nawet kreuje te zachowania w celu zapewnienia niezawodnego i efektywnego ekonomicznie dostarczania energii. Smart Grid pozwala wykorzystywać wiele funkcji i technologii równocześnie. Zwiększa komfort korzystania z energii i przynosi oszczędności indywidualnemu odbiorcy oraz niesie korzyści ekologiczne i makroekonomiczne. Jest nowoczesną, w pełni dyspozycyjną siecią opłataną systemami zdalnego i dwukierunkowego odczytu, dzięki którym spółka dystrybucyjna może kontrolować dostawy energii, rozpływy w sieci, sprawniej zarządzać jej wyłączeniami, szybciej reagować na awarie, bilansować moce przyłączanych farm wiatrowych czy biogazu, a także lepiej współpracować z krajowym systemem elektroenergetycznym [2]. Oprócz tego sieć ta obejmie funkcje związane z ładowaniem samochodów elektrycznych w domu, na stacjach i parkingach.

Z drugiej strony, dla odbiorcy energii sieć inteligentna oznacza aktywne zarządzanie jego własnym zapotrzebowaniem na energię,



Rys. 1. Podział na strefy wysokiego, średniego i niskiego napięcia
Fig. 1. The division into zones of high, medium and low voltage

co nie tylko obniży jego rachunek, ale w ważniejszym, społecznym wymiarze przyniesie także istotne korzyści ekologiczne, ponieważ wskutek racjonalniejszej gospodarki energetycznej zmniejszy się zapotrzebowanie na energię, a co za tym idzie, spadnie liczba nowobudowanych elektrowni konwencjonalnych. Inteligentna sieć wyczuwa, co dzieje się w całym systemie elektroenergetycznym – w generatorach, na liniach przesyłowych, u użytkowników końcowych – i kontroluje te aktywa w celu zapewnienia, w ekonomicznie wydajny sposób, czystej energii elektrycznej.

Polska będzie musiała sprostać Dyrektywie Unii Europejskiej, która wymaga, aby do 2020 roku 15 % naszej energii pochodziło z odnawialnych źródeł. Inteligentna sieć jest w stanie zarządzać zmiennymi i nieciągłymi źródłami energii, np. turbinami wiatrowymi. Ta funkcja jest niezbędna w przypadku nowych obciążeń sieci. Wiatr i biomasa są najbardziej obiecującymi źródłami polskiej zielonej energii. Obsługa energii z odnawialnych źródeł stanowi jednak duże wyzwanie dla sieci energetycznej.

Wiatr nie jest źródłem stałym, raz wieje silniej raz słabiej, a ponadto zarówno wiatr, jak i biomasa to źródła rozproszone (energia produkowana jest w mniejszych ilościach w wielu różnych miejscach), które wymagają wielu podłączeń do sieci, w przeciwieństwie do węgla, który może być spalany centralnie. Innym przykładem działania inteligentnej sieci jest sytuacja, w której zakład energetyczny może prognozować czas szczytowego zapotrzebowania na energię i „przykręcić” lub wyłączyć sprzęt mniej istotny, aby obniżyć moc szczytową. Zakład może również za pomocą inteligentnego opomiarowania wysłać do konsumentów sygnał dotyczący cen energii, aby pomóc im w wyborze, kiedy i jak najefektywniej korzystać z energii elektrycznej. Konsumenty będą mogli na przykład grzać

wodę w nocy, używać sprzętu AGD poza godzinami szczytu lub naładować akumulator pojazdu elektrycznego w czasie, gdy sieć nie jest mocno obciążona.

System ten jest także w stanie samodzielnie dokonywać podobnych wyborów. Inteligentne sieci pomogą zmniejszyć liczbę przerw w zasilaniu. W przypadku linii elektrycznej zerwanej w czasie burzy inteligentna sieć może „przekierować” energię, podczas gdy uszkodzone części sieci są w naprawie. Inteligentne sieci mogą wesprzeć zrównoważoną produkcję energii z konwencjonalnych elektrowni węglowych, dostarczając energię ze źródeł odnawialnych. Inteligentna sieć może również „odroczyć w czasie” zasilanie mniej istotnego sprzętu, do momentu, gdy ekologiczna i tania energia dotrze do odbiorcy.

Pomysły na rozwój technologicznej strony sieci przesyłowych pojawiały się już 20 lat temu, w postaci pilotażowych projektów systemów zdalnego odczytu liczników energii elektrycznej.

Proponowano także wzbogacanie infrastruktury sieciowej o telemechanikę, z różnymi pomysłami na jej wykorzystanie. Fachowcy-energetycy mówią, że wszystkie ówczesne wdrożenia były raczej testami, a nie rozwiązaniami mającymi szansę

na powszechne zastosowanie. Dziś jednak, w ślad za potężnym rozwojem telekomunikacji, informatyki i elektroniki, marzenia sprzed kilku dekad zaczynają przybierać postać realnych, kompleksowych rozwiązań. Pierwszym krokiem w kierunku inteligentnej sieci wydaje się być wdrożenie zaawansowanej infrastruktury pomiarowej AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) oraz inteligentnych liczników, które umożliwiają mierzenie zużycia prądu, napięcia i mocy w różnych obszarach sieci i w różnych celach. AMI daje operatorom energetycznym możliwość pomiaru jakości energii na zewnętrznych obszarach sieci, co z kolei ułatwia przewidywanie zapotrzebowania na energię z dużą dokładnością czasową i geograficzną, zarządzanie rozproszonym wytwarzaniem energii odnawialnej (słonecznej lub wiatrowej) oraz weryfikację statusu operacyjnego sieci przez wysyłanie zapytań do liczników. System ten pozwala również reagować na zmiany zapotrzebowania tam, gdzie w okresach szczytu ogranicza się pobór energii lub wyłącza urządzenia.

Rola operatora sieci dystrybucyjnej zazwyczaj polega na

gromadzeniu w czasie rzeczywistym dokładnych i aktualnych danych pomiarowych oraz na udostępnianiu ich różnym podmiotom. Ponadto, niektórzy detaliczni dostawcy energii instalują w domach dodatkowe liczniki w celu gromadzenia i przechowywania danych niezależnie od operatora sieci dystrybucji. Dziś wszyscy dostawcy oferują lekkie, nowoczesne liczniki elektroniczne, wzbogacane o różne funkcje pomiarowe. Co więcej, transmisja danych o poborze w dowolnej konfiguracji jest dzisiaj stosunkowo prosta, a przy odpowiednich warunkach także mało zawodna.

Początkowo termin „Smart Grid” dotyczył jedynie smart meteringu, czyli inteligentnych pomiarów. Jednak w krótkim czasie termin ten nabrał nowego znaczenia i dotyczy teraz znacznie większego zakresu działań

takich jak sterownie mocą czynną i bierną, automatyzacja, możliwość integracji z siecią ogniw fotowoltaicznych oraz samochodów elektrycznych [1]. Przedsiębiorstwa energetyczne muszą zatem dużo inwestować w swoje sieci, aby zwiększyć ich niezawodność. Inwestycje te dotyczą następujących obszarów:

- infrastruktura AMI dla sieci SN i NN: urządzenia pomiarowe (czujniki, inteligentne liczniki) i kontrolne (wyłączniki z samoczynnym ponownym zamykaniem, bezpieczniki), także na poziomie urządzeń domowych
- automatyzacja podstacji: systemy zarządzania energią i systemy w podstacjach, które monitorują zdarzenia i jakość dostaw energii, a także przełączniki kontrolne przepływu energii
- automatyzacja dystrybucji: komponenty i aplikacje sieci Smart Grid zwiększające niezawodność sieci dystrybucyjnej
- aplikacje Smart Grid (rozszerzone funkcje zarządzania awariami, systemy zarządzania aktywami itp.) w połączeniu ze sztuczną inteligencją ułatwiające eksploatację i utrzymanie sieci energetycznej.

Wizjonerskie pomysły zaczynają się zmieniać w rzeczywistość, głównie w krajach starej Europy, Ameryce Północnej



Rys. 2. Wizja przyszłości? [4]

Fig. 2. Vision of the future? [4]

i Japonii. Tam już wdrożono na skalę przemysłową systemy zdalnego odczytu liczników energii elektrycznej, a przy okazji także innych mediów: gazu, wody i ciepła. Największe jak dotąd wdrożenia odnotowano m.in. we Włoszech. Było to rozwiązanie typu AMM (*Automatic Meter Management*), obejmujące niemal kompletną infrastrukturę (30 mln liczników), czyli urządzenia, sieci transmisji danych, systemy komputerowe, protokoły komunikacyjne i systemy informowania odbiorcy o stanie licznika. Niedługo po tym podobne projekty przeprowadzono w Szwecji, Finlandii, Danii, Norwegii oraz Francji. W Polsce proces ten rozpoczął się w tym samym mniej więcej czasie, a dziś działa już kilkanaście instalacji zdalnego odczytu liczników odbiorców indywidualnych, obsługujących od kilkudziesięciu do tysiąca i więcej liczników. Wdrożenia te zastępują obsługę inkasencką, obniżając tym samym koszt energii elektrycznej dla odbiorcy.

Przedsiębiorstwa energetyczne, a w szczególności operatorzy systemów dystrybucyjnych, mogą zastosować inteligentne narzędzia i technologie, aby poprawić ogólną jakość usług energetycznych (np. automatyzacja kontroli przepływów energii oraz przywracanie sprawności sieci energetycznej po awarii). Systematycznie rośnie zapotrzebowanie na energię elektryczną, któremu obecna infrastruktura generacyjna i dystrybucyjna nie jest w stanie sprostać. Zwiększa się zagrożenie „blackoutami”. Brak zachęt prawnych i fiskalnych utrudnia nowe inwestycje w sektor generacji rozproszonej. Unijny Pakiet Klimatyczno-Energetyczny 20/20/20 nakłada na Polskę wymogi, którym będziemy mogli sprostać tylko przy wyłożonej pracy według przemysłowej i długoterminowej strategii. Wyzwania te są dodatkowo pogłębione przez postępujące zmiany klimatyczne, których rezultatem są anomalie pogodowe, czy małe rezerwy przesyłowe. Rząd powinien opracować i uruchomić system zachęt finansowych oraz odpowiednie ramy regulacyjno-prawne dla rozwoju inteligentnych sieci w Polsce. Przy współudziale sektora prywatnego powinien też przyjąć standardy techniczne dla kompatybilności technologii, jak ma to miejsce w innych branżach o znaczeniu strategicznym dla kraju. Pierwszym krokiem jest porozumienie co do tego, jakie możliwości i funkcje inteligentnej sieci będą korzystne dla Polski. Niezbędne jest dalsze finansowanie dla projektów demonstracyjnych. Bez oszacowania realnych korzyści trudno będzie przekonać podatników co do potrzeby modernizacji sieci elektroenergetycznych. Rząd odgrywa potężną rolę koordynacyjną w zakresie ochrony konkurencji i w ustanawianiu standardów. Należy zadbać o warunki opłacalności dla inteligentnych sieci poprzez zachęcanie dostawców usług – takich jak np. operatorzy internetowi – do koordynacji rozwoju ich sieci łączności z sieciami firm energetycznych. URE mogłoby rozwinąć model zysku dla zakładów elektroenergetycznych pokazujący, jak odzyskać koszty inwestycji kapitałowych w inteligentne sieci. Przydałaby się także ustawa dbająca o zrównoważoną eksploatację budynków administracji publicznej. Istotną kwestią w systemie inteligentnych sieci elektroenergetycznych jest cyber-bezpieczeństwo. Należy rozwinąć bezpieczne modele zarządzania zebranymi danymi i upewnić się, kto, kiedy, i w jaki sposób może z takich danych korzystać. Ponadto poszczególne ministerstwa będą musiały skoordynować swoje działania. Być może należy powołać ministra bez teki ds. implementacji inteligentnych sieci i niskoemisyjnych

technologii? Może specjalna podkomisja mogłaby połączyć i skoordynować prace ministerstw infrastruktury, środowiska i gospodarki? Wieloletni i powracający problem strukturalno-koordynacyjny w administracji publicznej przecież kiedyś będzie musiał zostać rozwiązany.

Korzyści z rozpoczęcia procesu wprowadzania inteligentnych sieci są dla państwa znaczące i obejmują poprawę efektywności zagospodarowania zasobów naturalnych, poprawę niezależności energetycznej państwa bez pogłębiania problemów związanych z wykorzystaniem węgla. Stanowią one podstawę proefektywnościowej edukacji społeczeństwa i ograniczają ryzyko kar, jakie Komisja Europejska może nakładać za przekraczanie limitów emisji. Odpowiednie połączenie zachęt finansowych i dobrze zaprojektowanych prawnych mechanizmów implementacyjnych pomoże w modernizacji sektora elektroenergetycznego i wzmocni polską gospodarkę. Po pierwsze, poprawa jakości energii elektrycznej i niezawodność sieci przesyłowych spowoduje zwiększenie wydajności przemysłu. Po drugie, konsumenci będą mogli monitorować swoje zużycie energii i aktywnie obniżać koszty swoich rachunków. Po trzecie, funkcje inteligentnych sieci ułatwią operatorom sprzedaż polskiej energii na zagranicznych rynkach. Ponadto Polska podejmie w ten sposób działania zgodne z dyrektywą UE, która skupia uwagę na możliwościach wprowadzenia inteligentnych systemów pomiarowych do 2020 roku. Polska gospodarka może jedynie skorzystać na modernizacji sieci energetycznej w procesie przechodzenia do gospodarki niskoemisyjnej.

Przejsie do technologii tak zaawansowanej jak Smart Grid niesie z sobą wiele trudności. Przekształcenie sieci w inteligentną to w pierwszym rzędzie zmiana infrastruktury przesyłowej na wytrzymującą większe przeciążenia, np. poprzez budowę sieci o większych przekrojach czy tych produkowanych w nowszej technologii, cyrkonowych. Ale to także masowa przebudowa instalacji w starych budynkach, rozwiązanie nurtujących już dziś spółki dystrybucyjne problemów z przyłączaniem odnawialnych źródeł energii i bilansowaniem energii wytwarzanej przez źródła rozproszone, kwestia zbliżenia generacji rozproszonej do punktów poboru i dużej elastyczności z przechodzeniem do pracy wyspowej. Widać więc jasno, że pierwszą i największą przeszkodą dla rozwoju sieci energetycznych są koszty modernizacji. Przykładowo, aby wdrożyć w polskich spółkach dystrybucyjnych tylko jedno z narzędzi czyli smart metering (zdalny odczyt), trzeba wymienić liczniki na te z odpowiednią aparaturą i ponieść znaczne nakłady na centralne systemy akwizycji i przetwarzania pozyskiwanych danych. Eksperti oceniają, że koszt takiej operacji to około 100 EUR dla każdego z 13,5 mln liczników. Zatem w sumie to koszt potężny. Ponadto wdrażanie inteligentnych sieci w Polsce utrudnione jest strukturą własności państwowej. Wieże przesyłowe i linie wysokiego napięcia są własnością spółki skarbu państwa PSE Operator SA. Inwestycje w inteligentne sieci powodowane są szeregiem czynników ekonomicznych, społecznych i politycznych. Polska, jako członek UE, jest zobowiązana do unowocześnienia sieci energetycznej zgodnie z dyrektywami unijnymi. Musimy zwiększyć udział energii odnawialnej w polskiej energetyce. Nie można pominąć tu także kwestii bezpieczeństwa energetycznego kraju. Inteligentne sieci mogłyby w znacznym stopniu przyczynić się do poprawy odporności sieci na wandalizm i usprawnić dywersyfikację źródeł energii. Przy modernizacji sektora energetycznego na skalę krajową, żadna

nowa technologia nie zastąpi adekwatnej polityki. Polska postawa regulacyjna w stosunku do inteligentnych sieci powinna wspierać innowację i kompatybilność technologii. Głównymi celami wprowadzenia smart grid są bezpieczeństwo, pewność zasilania, lepsza jakość energii, ochrona środowiska oraz ograniczenie kosztów.

Wprowadzenie inteligentnych liczników planowane jest także w krajach europejskich, jednak nie w celu pokonania problemów sieciowych, lecz wypełnienia wytycznych Wspólnoty Europejskiej. Unia nakazała dostawcom energii, aby ci do 2012 r. przygotowali przejrzysty sposób naliczania comiesięcznych kosztów zużycia prądu. Jeśli wytyczna unijna zostanie wprowadzona do prawodawstwa poszczególnych krajów, miesięczne rozliczenie może być podobne do rachunków za telefon stacjonarny bądź komórkowy.

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska zadeklarował możliwość wykorzystania środków pobieranych w ramach opłat za emisję CO₂. Prace nad analizami korzyści w stosunku do kosztów wdrożenia smart metering rozpoczęło także PTPiREE, co należy uznać za dobrą prognozę na przyszłość.

Rozwój aplikacji Smart Grid

System Smart Grid jest zbudowany z urządzeń i czujników, a także aplikacji, które wspomagają eksploatację i utrzymanie sieci energetycznej oraz zarządzanie nią. Aplikacje te wspierają takie procesy, jak planowanie przerw w dostawie prądu i rozszerzeń sieci, monitorowanie sieci, a także konserwacja i usuwanie awarii sieci. Niezawodność sieci energetycznej zależy w dużym stopniu od sprawnego systemu komunikacyjnego dla pracowników mobilnych i klientów. Biorąc pod uwagę stały rozwój teorii sztucznej inteligencji i jej praktycznych zastosowań, można przypuszczać, iż aplikacje inteligentnych sieci będą oparte właśnie na tej technologii. Narzędzia sztucznej inteligencji (sieci neuronowe, logika rozmyta, algorytmy genetyczne) okazały się wygodnym narzędziem, przydatnym przy realizacji bardzo wielu różnych praktycznych zadań. Wszędzie tam, gdzie pojawiają się problemy związane z przetwarzaniem i analizą danych, z ich predykcją, klasyfikacją czy sterowaniem, mogą być zastosowane sieci neuronowe.

Sieci neuronowe mogą być bardzo skuteczne jako narzędzia obliczeniowe rozwiązując zadania, z którymi typowe komputery i typowe programy sobie nie radzą. Sieci neuronowe w stosunku do typowych systemów obliczeniowych mają dwie zasadnicze zalety. Po pierwsze, obliczenia wykonywane są w sieciach neuronowych równoległe, w związku z czym szybkość pracy sieci neuronowych może znacznie przewyższać szybkość obliczeń sekwencyjnych. Drugą zaletą sieci jest możliwość uzyskania rozwiązania problemu z pominięciem etapu konstruowania algorytmu rozwiązania problemu. Powoduje to, że sieci neuronowe mogą być stosowane tam, gdzie zastosowanie tradycyjnych metod napotyka na wielkie trudności, szczególnie w zadaniach wymagających kojarzenia informacji, jak na przykład prognozowanie, rozpoznawanie, klasyfikowanie i diagnostyka. W przypadku sieci symulowanych komputerowo stosowane algorytmy są często prostsze od rozwiązujących to samo zadanie algorytmów realizowa-

nych drogą bezpośredniego programowania modelu, dlatego czas i koszty wdrażania systemu zawierającego metody oparte na sieciach neuronowych są zazwyczaj znacznie mniejsze.

Podsumowanie

Smart Grid – inteligentna, wielofunkcyjna sieć przesyłowa przyszłości – to narzędzie efektywniejszego wykorzystania coraz droższych surowców energetycznych. Na powszechnym wdrożeniu inteligentnych sieci zyskają indywidualni odbiorcy, krajowe gospodarki i środowisko naturalne. Europa dąży dziś do wzrostu efektywności energetycznej oraz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Idea Smart Grid może być bodźcem dla rozwoju gospodarki oraz zwiększenia efektywności i bezpieczeństwa elektroenergetycznego.

Bibliografia

1. Malko J.: *Sieci inteligentne – jako czynnik kształtowania sektora energii elektrycznej*. Rynek Energii Nr 2 (87), 2010.
2. Kałuża W.: *Smart Metering i inne inteligencje*. Elektroenergetyka – współczesność i rozwój nr 1 (3), 2010.
3. Farhangi H.: *The Path of the Smart Grid*. IEEE Power&Energy Mag. Vol. 8 Nr 1, Jan/Febr 2010.
4. www.renewable-energy.fr ■

Smart Grid – network of the future

The development of electricity networks depends mainly on new technologies. Smart Grid – an intelligent, multi-grid is a tool for the future efficient use of increasingly expensive energy resources. In general implementation of intelligent networks will benefit individual customers, the national economy and the environment. Europe is now seeking to increase energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions. Smart Grid is a challenge which seeks to this ambitious goal. The article presents the ideas of intelligent networks that will help energy companies to increase the reliability of energy supply and operational efficiency, expanding the scope of measurement and control of power systems and management of new technologies, even in the farthest points of the grid.

Keywords: smart grid, new technologies, electricity, renewables

dr inż. Wiesław Kopterski

Adiunkt w Katedrze Sieci, Systemów i Urządzeń Elektrycznych Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Opolskiej. Praca naukowa dotyczy niezawodności sieci elektroenergetycznych oraz prognozowania w elektroenergetyce.

e-mail: w.kopterski@po.opole.pl

