

## Pojazdy elektryczne jako mobilne źródła mocy biernej

**Streszczenie.** Pojazdy elektryczne są elementem składającym się na inteligentną sieć elektroenergetyczną (Smart Grid), bowiem poza funkcją transportową mogą dostarczać usług energetycznych w zakresie bilansowania mocy. W tym celu można odpowiednio wykorzystywać sterowalne układy ładowania takich pojazdów. Oczywistym wydają się zastosowania w bilansowaniu energii elektrycznej o charakterze czynnym. Tymczasem, w światowej literaturze pojawiły się pierwsze opracowania, pokazujące możliwości wykorzystywania pojazdów elektrycznych do dostarczania mocy biernej, zgodnie z potrzebami systemu dystrybucyjnego. Artykuł przybliża tą problematykę, przedstawiając przegląd stanu wiedzy technicznej oraz zagranicznej literatury związanej z tą nowatorską problematyką.

**Abstract.** Electric vehicles are components of a Smart Grid as, in addition to the transport function, they can provide ancillary energy services like balancing power in power systems. For this purpose, it is possible to use controlled charging systems of such vehicles. Obviously, electric vehicles may also be applied in balancing of the active power. Meanwhile, in the world literature, one comes across the first studies showing the possibility of using electric vehicles to provide reactive power to distribution grid, in accordance to the needs of electric power system. The paper introduces these issues, presents an overview of the state of technical knowledge and international articles related to the subject matter. (**Electric Vehicles as a Mobile Source of Reactive Power**).

**Słowa kluczowe:** pojazdy elektryczne, moc bierna, V2G, usługi systemowe, inteligentne sieci elektroenergetyczne

**Keywords:** electric vehicles, reactive power, V2G, ancillary services, Smart Grid

### Wstęp

Jednym z elementów inteligentnej sieci energetycznej (Smart Grid) jest możliwość jej współpracy z pojazdami elektrycznymi. Samochody elektryczne mogą być traktowane nie tylko jako środki transportu, ale również jako mobilne punkty realizujące nowe usługi na wielką skalę [1]. Mogą pełnić rolę rozproszonych dostawców regulacyjnych usług systemowych z zakresu dostarczania i pobierania mocy, przy czym skoro sieć elektroenergetyczna wykorzystuje prąd przemienny, bilansowanie musi dotyczyć mocy (energii) zarówno czynnej, jak i biernej.

Obecnie, do usług regulacyjnych zalicza się m.in. czynność pn. zmiana mocy biernej na żądanie operatora sieci (przesyłowej, OSP lub dystrybucyjnej, OSD). Usługa ta, polegająca na regulacji poboru mocy biernej indukcyjnej/pojemnościowej na żądanie OSD poprzez dostarczanie tejże mocy w punkcie przyłączenia, może być wykorzystana m.in. do:

- bieżącej regulacji napięcia w punkcie przyłączenia – wytwarzanie mocy biernej pojemnościowej lub indukcyjnej o wartości, jaka wynika z zadanego poziomu napięcia;
  - kompensacji mocy biernej – kompensowanie przepływów tejże mocy w danym obszarze sieci dystrybucyjnej.
- Usługa z zakresu regulacji mocy biernej może być realizowana w jednostkach generacji rozproszonej, zależnie od [2], [3]:

- wykresu kołowego generatora – jednostki z generatorem synchronicznym: kogeneracyjne (CHP, biogazowe); elektrownie wodne; elektrownie wiatrowe;
- obszaru dopuszczalnej pracy – generatory indukcyjne dwustronnie zasilane w elektrowniach wodnych;
- możliwości przekształtnika łączącego jednostkę z siecią – elektrowni wiatrowych i elektrowni słonecznych (PV).

Możliwości regulacyjnych mocy biernej nie posiadają jednostki (wodne i wiatrowe) z generatorami indukcyjnymi klatkowymi, chyba że wyposażone są w sterowalne urządzenia kompensacji (baterie kondensatorów, dławiki). Sterowalne źródła tej mocy we współczesnych sieciach elektroenergetycznych znajdują się więc tylko w określonych miejscach i mają ograniczone zdolności, stąd potrzebnym rozwiązaniem jest wykorzystanie rozproszonych a zarazem mobilnych źródeł tej mocy. W tym celu warto rozważyć jakie możliwości dają układy zasilania i ładowania pojazdów elektrycznych.

### Potencjał usługi V2G

Należy spodziewać się, że usługa „pojazd do sieci” V2G (vehicle to grid), umożliwiającą magazynowanie i wymianę energii pomiędzy siecią elektroenergetyczną a pojazdem elektrycznym, stanie się atrakcyjną zarówno dla OSD jak i samych właścicieli pojazdów elektrycznych. Wynika to poniekąd z tendencji wzrostowej liczby użytkowanych pojazdów elektrycznych.

W Europie w 2014 roku zarejestrowano łącznie 65,9 tyś. samochodów elektrycznych, podczas gdy w 2013 roku – 40,7 tyś., zaś w 2015 r. tylko do 1 listopada zarejestrowanych zostało już 76 tyś. Największy rynek takich pojazdów w Europie jest w Norwegii, Francji, Niemczech i Wielkiej Brytanii. Łącznie w 2015 roku dokonano w tych krajach blisko 75% europejskich rejestracji samochodów elektrycznych.

Szacuje się, że samochód elektryczny zużywa 120 - 240 Wh/km (średnio ok. 150 Wh/km), a średni przebieg roczny to ok. 20 000 km, zatem pojazd zużyje rocznie 3 MWh energii elektrycznej [4], [5]. W Polsce, według danych ACEA (Stowarzyszenie Europejskich Producentów Samochodów) na 1000 mieszkańców przypada 599 aut osobowych (wg „Statistical pocketbook 2015”: 504 na 1000 osób). Współczesna zachodnioeuropejska średnia moc samochodów dostępnych na rynku, według *Polk Marketing Systems*, wynosi 85 kW. Oznacza to, że moc wszystkich osobowych pojazdów samochodowych w Polsce jest rzędu 2 000 GW. Tymczasem, moc zainstalowana w krajowym systemie elektroenergetycznym to około 38 GW. Potencjał zasobów mocy, jaki może tkwić w pojazdach elektrycznych jest więc godny uwagi.

Warto w tym miejscu zauważyć, że obecnie wysoka cena pojazdów elektrycznych, w tym samego układu zasilania z baterii, zniechęca potencjalnych użytkowników do zakupu. Tymczasem, możliwości jakie daje realizacja usług V2G może ograniczyć koszty eksploatacji pojazdów elektrycznych i w rachunku ciążonym, wykazać opłacalność ich kupna. Wymaga to jednak m.in. zmian w zakresie rozliczeń za użytkowanie energii elektrycznej i rozszerzenia funkcjonowania rynku energii. W szczególności, należy wprowadzić odpowiednie zachęty dla użytkowników świadczących usługi systemowe na rzecz OSD, w celach związanych z utrzymaniem niezawodności i jakości zasilania w obszarze zarządzanej sieci, w tym dotyczących regulacji mocy biernej.

Wpływ na zainteresowanie usługą V2G będą mieć coraz krótsze czasy ładowania pojazdów oraz szybkie reakcje układu baterii. Aspekty związane z wymianą korzyści między elektroenergetyką a elektrycznymi środkami transportu stały się tematem badań niemal przeszło dwie dekady temu [6], [7].

W obszarze zainteresowania elektroenergetyki są samochody napędzane tylko elektrycznie (EV, electric vehicle) i hybrydowe z możliwością ładowania poprzez sieć elektroenergetyczną (PHEV, plug-in electric vehicle).

W literaturze światowej spotyka się też określenia kompromisujące obie kategorie, mianowicie: BEV (battery electric vehicle) lub PEV (plug-in electric vehicle). Cechą wspólną PEV jest obecność układu ładowania zamieniającego dostarczaną z sieci energię prądu przemiennego (AC) na stałą (DC) o parametrach wymaganych przez ładowaną baterię. Używane są również określenia: REEV (range extended electric vehicle) lub EREV (extended range electric vehicle), jako odmiana PHEV, posiadające dodatkową jednostkę (APU) z generatorem, służącym do ładowania baterii oraz FCHV (fuel cell hydrogen vehicle) z ogniwami paliwowymi.

### **Problematyka dostarczania mocy biernej przez pojazdy elektryczne (PEV) – przegląd zagadnień**

Początki technologii pojazdów elektrycznych datowane są już na połowę XIX wieku. Koncepty współpracy PEV z siecią w rozumieniu idei SmartGrid to pomysły głównie ostatniej dekady. Ostatnio, w literaturze naukowej pojawiły się opracowania analizujące możliwości wykorzystania PEV w zakresie regulacji mocy biernej w sieci elektroenergetycznej.

Prace [8], [9] poruszają temat regulacji współczynnika mocy dzięki układom ładowania pojazdów PEV podczas przepływu energii czynnej tylko w celu ładowania baterii pojazdu. Z kolei w pracach [10], [11], [12] można już znaleźć opisy jednofazowych układów ładowania pojazdów, predestynowanych do usług V2G, pracujących zarówno w trybie ładowania jak i oddawania energii czynnej do sieci. Aspekty techniczne, związane z dostarczaniem mocy biernej do sieci na żądanie OSD przez układy ładowania PEV (jako źródła napięcia z elementami przekształtnikowymi) przedstawiono również w pracach [13], [14].

Pojazdy PEV można traktować jako mobilne, sterowalne źródła mocy biernej w systemie, realizujące usługę V2G w trakcie postoju na parkingu. Pojazdy te mogą pozostawać w dyspozycji OSD przez nawet około 22 godziny dziennie [15]. Realizacja usługi V2G wymaga utworzenia właściwej infrastruktury ładowania oraz odpowiednich mechanizmów rozliczeń finansowych.

W publikacji [16] zajęto się rozwiązaniem problemu wyboru najmniej kosztownych lokalizacji stacji ładowania pojazdów ze względu na realizację usług dostarczania mocy biernej w trybie V2G. Autorzy sformułowali problem jako zadanie optymalizacji wielokryterialnej. Jedno kryterium jest związane z rozmieszczeniem stacji ładowania zgodnie z wymogami sieci elektroenergetycznej i warunkami jej pracy, uwzględniając przy tym rozkład ulic. Drugie kryterium, związane jest z wyborem miejsc parkingowych przez samych użytkowników pojazdów tak, aby były dogodne dla nich, a przy okazji koszty ładowania były możliwie najniższe. Te dwa cele mogą być wzajemnie sprzeczne. Autorzy pracy zaproponowali algorytm rozwiązania, oparty na dekompozycji Lagrange'a i wyboru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto.

W pracy [17] przedstawiono wyniki symulacji na modelu współpracy pojazdów PEV z siecią elektroenergetyczną. Opierając się na rezultatach symulowanych scenariuszy

(ładowanie/oddawanie energii czynnej oraz obciążenie mocą bierną pojemnościową/indukcyjną) przedstawiono możliwości realizacji usługi V2G, pokazując realne korzyści względem zapotrzebowania, czasu realizacji usługi i zużycia baterii. Symulacje potwierdzają, że najwięcej korzyści z realizacji usługi należy spodziewać się w czasie szczytowego obciążenia z uwagi na zwiększone potrzeby ze strony OSD.

Do zalet możliwości wykorzystania pojazdów PEV w regulacji poziomów mocy biernej można zaliczyć to, iż na podstawie przeprowadzanych badań i analiz stwierdzono, że samo dostarczanie przez PEV mocy biernej do sieci nie wpływa negatywnie na żywotność baterii pojazdu [18], [19].

W pracach [20], [21], [22] prezentowany jest model realizacji usługi regulacji mocy biernej przez pojazdy PEV, uwzględniający koszty zużycia baterii w funkcji mocy czynnej. W [21] przyjęto do minimalizacji funkcję celu, reprezentującą koszty ładowania i oddawania energii. Funkcja uwzględnia m.in. stopień zużycia baterii oraz wielkość składowej zmiennej mocy chwilowej układu ładowania. Proponowany algorytm po wyznaczeniu optymalnej wielkości energii czynnej potrzebnej do ładowania baterii lub oddania do sieci podczas postoju pojazdu, określa plan możliwych operacji w zakresie dostarczania mocy biernej przez tenże pojazd. Algorytm uwzględnia dostępny zakres mocy biernej (pojemnościowej i indukcyjnej) oraz koszty krańcowe. Opracowanie to, zdaniem autorów, może pomóc w bilansowaniu mocy biernej w obszarach sieci na życzenie OSD, zwłaszcza w okresach zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną.

W pracy [22] w oparciu o procedury programowania liniowego, minimalizowana jest funkcja kosztów operacyjnych z ograniczeniami, wynikającymi z uwarunkowań technicznych. Opracowany algorytm umożliwia wyznaczenie płatności na rzecz użytkowników pojazdów w ramach różnych struktur rynków energii oraz w sytuacji, gdy OSD zażąda w czasie rzeczywistym zwiększenia poziomu dostarczania mocy biernej, ponad wcześniej zakontraktowaną wartość.

Model określania kosztów operacyjnych PEV w zakresie współpracy z siecią, zaproponowany w [20] obejmuje możliwość ładowania i oddawania energii czynnej oraz dostarczanie usług w zakresie regulacji mocy biernej, biorąc pod uwagę uwarunkowania techniczne PEV odnośnie dysponowania mocą bierną. Rezultaty symulacji, przeprowadzone na różnych scenariuszach pokazują, że nieuwzględnienie kosztów zużycia (degradacji) baterii PEV, związanych z operacjami na mocy czynnej, mogą prowadzić do błędnych wyników optymalizacji kosztów operacyjnych użytkownika PEV. Pokazano, że w określonych sytuacjach pojazd PEV może w pełnym, maksymalnie możliwym zakresie, realizować usługę, pobierając lub oddając moc bierną do sieci. Autorzy pracy zwracają więc uwagę, że właściwe opracowanie zasad świadczenia usług w zakresie regulacji mocy biernej w sieci, z odpowiednimi sygnałami cenowymi zachęci użytkowników PEV do aktywnego uczestnictwa na rynku energii i mocy biernej, a to przyniesie wymierne korzyści zarówno właścicielom pojazdów jak i operatorom sieci.

Zauważalne jest, że problematyka wykorzystania pojazdów PEV w zakresie regulacji mocy biernej w sieci elektroenergetycznej od strony formułowania odpowiednich zasad rozliczeń w warunkach konkurencyjnego rynku energii jeszcze nie jest powszechnie poruszana w literaturze naukowo-technicznej [21].

Model funkcjonowania rynku energii w zakresie rozliczeń za moc bierną z udziałem pojazdów PEV został opisany w [23]. Praca ta w istocie bezpośrednio aplikuje

rozwiązania predestynowane generacji rozproszonej do problematyki wykorzystywania pojazdów PEV w zakresie regulacji mocy biernej. Przyjęty model opiera się na tworzeniu relacji należnych odszkodowań dla poszczególnych użytkowników pojazdów, po czym na ich podstawie operator systemu wyznacza działania minimalizujące koszty dla systemu. Autorzy [21] w oparciu o analizę pracy [24] poddają w wątpliwość słuszność podejścia zakładającego tożsamość w traktowaniu pojazdów PEV i jednostek generacji rozproszonej, m.in. ze względu na fakt, że pojazdy PEV przede wszystkim pobierają energię z sieci do ładowania baterii.

Użytkownik pojazdu PEV w celu optymalizacji kosztów, może planować z wyprzedzeniem konkretną lokalizację stacji ładowania, biorąc pod uwagę m.in. potrzebną ilość energii (pobranej lub oddanej do sieci), czas i długość postoju. Wymaga to koordynacji pomiarów, wprowadzenia odpowiednich metod prognozowania, właściwej konstrukcji systemu rozliczeń finansowych, co może być realizowane przez kolejny podmiot pośredniczący na rynku energii, oferujący usługi agregacji pojazdów PEV dla OSD w celu bilansowania mocy w sieci. Podmiot ten może również pośredniczyć w rozliczeniach finansowych z użytkownikami pojazdów PEV. Zróżnicowanie czasowe stawek za energię komplikuje problem optymalizacji korzyści finansowych. Świadczenie usługi w zakresie dostarczania mocy biernej może spowodować ograniczenie poboru mocy czynnej i wydłużenie czasu ładowania (ograniczenie mocy pozornej – rys. 1). To może powodować konieczność przesunięcia chwili ładowania baterii na okres, w którym cena za energię

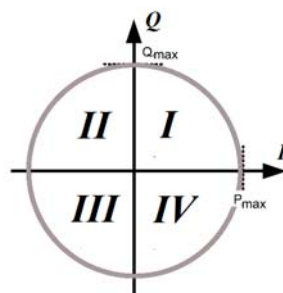
czynną może okazać się wyższa. Wymaga to więc wprowadzenia odpowiednich stawek cenowych za usługi systemowe, kompensujących utracone korzyści.

### Dostarczanie mocy biernej w ramach V2G – aspekty techniczne

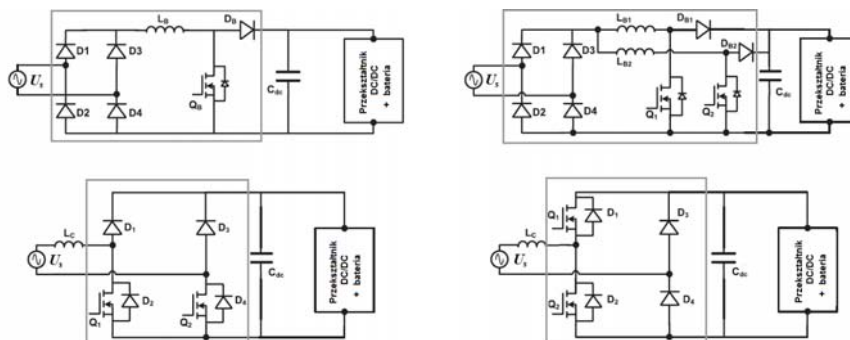
Obszary pracy układu zasilającego PEV, teoretycznie ograniczone dopuszczalną mocą pozorną  $S$  przedstawia rysunek 1 i tabela 1.

Tabela 1. Obszary pracy układu zasilania PEV.

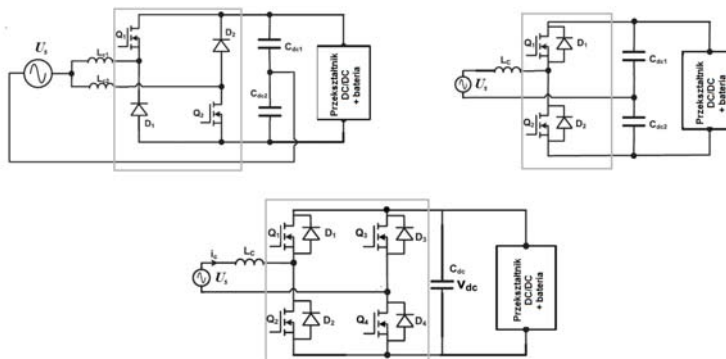
		Moc (energia) czynna P	
		Ładowanie	Oddawanie do sieci
Moc (energia) Bierna Q	Indukcyjna	I	II
	Pojemnościowa	IV	III



Rys. 1. Obszary pracy układu zasilania PEV na płaszczyźnie P-Q.



Rys.2. Układy ładowania EV z korekcją współczynnika mocy przy jednokierunkowym przepływie energii czynnej.



Rys. 3. Układy ładowania PEV przy dwukierunkowym przepływie energii czynnej (czterokwadrantowe).

**Konstrukcja układu ładowania pojazdów PEV** Układ ładowania pojazdu elektrycznego może być traktowany jak sterowalne źródło napięciowe, mogące dostarczać do sieci

moc bierną o zadanej wartości przy określonym kącie fazowym [17]. Dostarczanie mocy biernej z układu ładowania PEV nie wymaga bezpośredniego

zaangażowania baterii, więc taki tryb pracy praktycznie nie wpływa na jej żywotność [18], [19].

Spotykane konstrukcje układów ładowania pojazdów PEV składają się zazwyczaj z następujących części (rys. 2):

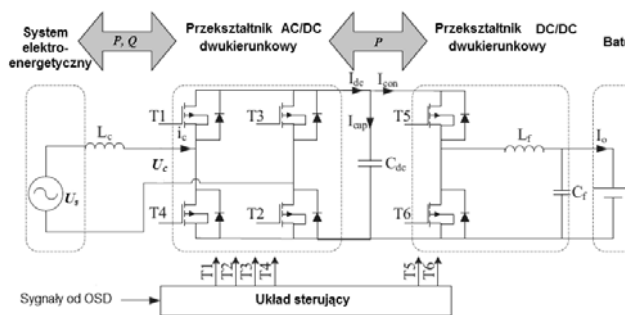
- przewodu łączącego sieć elektroenergetyczną z ładowarką pojazdu;
- przekształtnika AC/DC;
- gałęzi DC z pojemnością  $C_{dc}$ ;
- przekształtnika DC/DC;
- baterii pojazdu;
- indukcyjności  $L_c$  szeregowej w gałęzi przewodu łączącego lub indukcyjności  $L_B$  wewnątrz przekształtnika AC/DC.

Konstrukcje układów ładowania można podzielić na dwie grupy: z korekcją współczynnika mocy (PFC) przy jednokierunkowym (rys. 2) i i dwukierunkowym przepływie energii czynnej (cztero-kwadrantowe) (rys. 3) [25]. W szczególności, układy ładowania można również podzielić na te, które znajdują się na pokładzie pojazdu (on-board) oraz te, które znajdują się poza pojazdem (off-board) [14]. W tym ostatnim, „tankowanie” wówczas polega na wymianie wyczerpanej baterii na naładowaną.

W obecnie produkowanych pojazdach PEV instalowane są zazwyczaj układy ładowania jednokierunkowego PFC, operujące jedynie w obszarach I i IV płaszczyzny P-Q, tzn. umożliwiające tylko ładowanie baterii, a nie oddawanie energii z powrotem do sieci (rys. 2). Mogą one realizować usługę dostarczania mocy biernej (pojemnościowej lub indukcyjnej) w określonym zakresie, co nie jest to zalecane, ponieważ:

- regulacja oddawanej mocy biernej może być osiągnięta tylko poprzez naturalną komutację prądu płynącego przez diody, co ogranicza wielkość kąta przesunięcia między napięciem sieci a prądem zależnym od dodatkowej indukcyjności, gdyż w innym przypadku może dojść do zwiększenia zawartości wyższych harmonicznych ponad dopuszczalny limit,
- przepływ mocy biernej w kierunku sieci jest możliwy tylko podczas procesu ładowania baterii, czyli proces nie jest możliwy przy w pełni naładowanej baterii.

Pełna realizacja usługi V2G jest możliwa przy cztero-kwadrantowych konstrukcjach układu ładowania pojazdów (rys. 3). Najpełniejszy jest układ z przekształtnikiem AC/DC pełnomostkowym z czterema diodami i czterema tranzystorami (MOSFET lub IGBT), których komutacją można sterować na podstawie sygnałów od OSD (rys. 4)



Rys. 4. Pełnomostkowy cztero-kwadrantowy układ ładowania pojazdu PEV.

#### Obszary pracy układów ładowania pojazdów PEV

Przepływ mocy czynnej pomiędzy pojazdem a siecią elektroenergetyczną jest możliwy dzięki wykorzystaniu baterii ładowanej prądem stałym DC. Przepływy mocy biernej są możliwe dzięki elementom reaktacyjnym, tj. pojemności  $C_{dc}$  w gałęzi prądu stałego oraz indukcyjności  $L_c$  lub  $L_B$ . Sterowanie przepływami mocy odbywa się poprzez

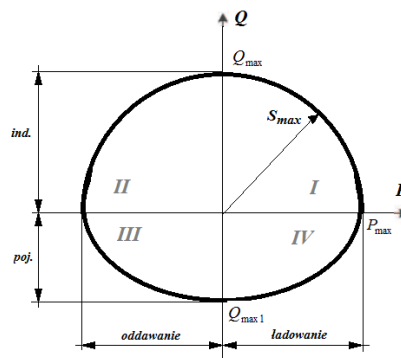
odpowiednią komutację zaworów energoelektronicznych. Moc bierna  $Q_s$ , jaka przepływa do sieci od układu ładowania pojazdu odpowiada mocy biernej wytwarzanej w układzie przekształtników, skorygowanej o moc związaną z elementem indukcyjnym  $L_c$  w gałęzi łączącej sieć z pojazdem. Indukcyjność ta powoduje, że możliwy obszar pracy całego układu ładowania, widziany z zacisków sieci elektroenergetycznej ma kształt quasi-okrągły. Zakres możliwej wymiany energii (mocy) między pojazdem PEV a siecią jest ograniczony dopuszczalną mocą pozorną układu ładowania (elementów przekształtnikowych), tj.  $S_{max}$ , przy czym z uwagi na element indukcyjny  $L_c$ , zakres oddawania mocy biernej (indukcyjnej) do sieci jest mniejszy niż jej pobierania. W związku z tym, zakres punktów pracy całego układu względem sieci na płaszczyźnie P-Q spełnia relacje [17]:

$$(1) \quad \begin{cases} P^2 + Q^2 \leq S_{max}^2 & \forall Q > 0 \\ \left( P^2 + Q^2 \left( 1 - \frac{\omega L_c}{U_s^2} Q \right)^2 \right) \leq S_{max}^2 & \forall Q \leq 0 \end{cases}$$

gdzie  $U_s$  – napięcie sieci w punkcie przyłączenia PEV (wartość skuteczna). Największa możliwa wartość mocy biernej, jaka może zostać wstrzyknięta do sieci z pojazdu PEV wynosi [20]:

$$(2) \quad Q_{max1} = \left[ \sqrt{1 + 4 \frac{\omega L_c}{U_s^2} S_{max}} - 1 \right] \frac{U_s^2}{2\omega L_c}$$

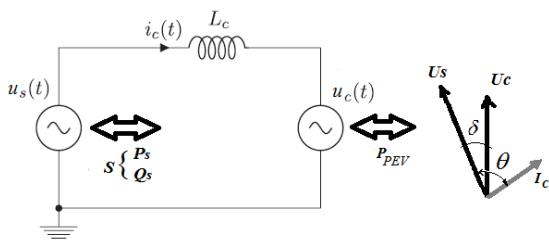
Na rys. 5 przedstawiono zakres dopuszczalnych obciążeń mocą czynną i bierną (dostarczanie/pobieranie z sieci) układu ładowania pojazdu PEV widzianych od strony zacisków sieci elektroenergetycznej. Warto zauważyć, że z geometrii okręgu wynika, iż zwiększenie obciążenia mocą czynną do granic dopuszczalnego zakresu wiąże się z ograniczeniem zakresu regulowania udziału mocy biernej i na odwrót.



Rys. 5. Praktyczne zakresy obszarów pracy układów ładowania PEV na płaszczyźnie P-Q.

#### Rozpływy mocy

Model współpracy pojazdu PEV z siecią elektroenergetyczną, traktujący zarówno sieć, jak i układ ładowania, jako źródła napięcia przemienneo o charakterze sieci sztywnej, z wyodrębnionym elementem indukcyjności szeregowej  $L_c$  w gałęzi łączącej pokazano na rysunku 6. W poniższych rozważaniach dokonano upraszczającego założenia, że przebiegi prądów i napięć w układzie są sinusoidalne. Pominięto zatem wpływ układów konwertujących AC/DC na odkształcenia przebiegów.



Rys. 6. Schemat modelu połączenia sieci elektroenergetycznej z układem ładowania PEV (czterokwadrantowym).

Analizując wartości chwilowe mocy przepływających przewodem łączącym pojazd PEV z siecią elektroenergetyczną, można wyznaczyć wartości przepływów mocy biernej między siecią a podłączonym do niej pojazdem.

Wartość chwilowa napięcia po stronie sieci:

$$(3) \quad u_s(t) = \sqrt{2}U_s \sin(\omega t)$$

Wartość chwilowa napięcia po stronie układu ładowania:

$$(4) \quad u_c(t) = \sqrt{2}U_s \sin(\omega t - \delta)$$

gdzie  $\delta$  - kąt przesunięcia między wskazami napięć w sieci i na wejściu układu ładowania (rys. 6.).

Prąd w przewodzie łączącym:

$$(5) \quad i_c(t) = \sqrt{2}I_c \sin(\omega t - \theta)$$

Można pokazać, że kąt przesunięcia fazowego wynosi:

$$(6) \quad \theta = \text{artg} \left( \frac{U_s - U_c \cos(\delta)}{U_c \sin(\delta)} \right)$$

Uwzględniając (1) i (2), moc chwilowa wypływająca z sieci do PEV będzie wynosić:

$$(7) \quad p_s(t) = u_s(t)i_c(t) = U_s I_c \cos(\theta) - U_s I_c \cos(2\omega t - \theta)$$

Tymczasem, moc chwilowa związana z obecnością indukcyjności w przewodzie zasilającym układ ładowania PEV:

$$(8) \quad p_L(t) = u_L(t)i_c(t) = L_c \frac{di_c(t)}{dt} i_c(t) = \omega L_c I_c^2 \sin(2\omega t - 2\theta)$$

Zatem, do samego układu ładowania pojazdu dopływa moc:

$$(9) \quad p_{PEV}(t) = p_s(t) - p_L(t) =$$

$$U_s I_c \cos(\theta) - U_s I_c \cos(2\omega t - \theta) - \omega L_c I_c^2 \sin(2\omega t - 2\theta)$$

Oznaczając moce przepływające z sieci (rys.6), odpowiednio czynną, bierną i pozorną:

$$(10) \quad P_s = U_s I_c \cos \theta \quad Q_s = U_s I_c \sin \theta \quad S = U_s I_c,$$

uzyskaną wielkość  $p_{PEV}(t)$  można, wykorzystując przekształcenia trygonometryczne, rozłożyć na składowe: nieujemną (czynną)  $p_P(t)$  oraz oscylacyjną (bierną)  $p_Q(t)$ :

$$(11) \quad p_{PEV}(t) = p_P(t) - p_Q(t)$$

$$p_P(t) = P_s [1 - \cos(2\omega t)]$$

$$p_Q(t) = Q_s \sin(2\omega t) + \omega L_c I_c^2 \sin(2\omega t - 2\theta)$$

lub rozłożyć na składową stałą (średnią), równą mocy  $P_s$  oraz składową zmienną:

$$(12) \quad p_{PEV}(t) = P_s + p_{ripp}$$

gdzie:

$$(13) \quad P_s = U_s I_c \cos(\theta)$$

$$(14) \quad p_{ripp}(t) = -U_s I_c \cos(2\omega t - \theta) - \omega L_c I_c^2 \sin(2\omega t - 2\theta) = P_{ripp} \cos(2\omega t + \beta)$$

$$(15) \quad P_{ripp} = \sqrt{S^2 + \left( \omega L_c \frac{S^2}{U_s^2} \right)^2} - 2\omega L_c \frac{S^2}{U_s^2} Q_s$$

$$(16) \quad \beta = \text{artg} \left( \frac{U_s I_c \sin \theta + \omega L_c I_c^2 \cos(2\theta)}{\omega L_c I_c^2 \sin(2\theta) - U_s I_c \cos \theta} \right)$$

Analizowane układy ładowania pojazdów PEV są jednofazowe. Zgodnie z przyjętą w klasycznej teorii mocy interpretacją fizyczną mocy biernej w obwodach jednofazowych z przebiegami sinusoidalnymi, moc ta odpowiada amplitudzie składowej oscylującej mocy chwilowej w obwodzie. Według zależności (11) składowa oscylacyjna jest sumą oscylacji związanych z mocą bierną, jaka przepływa między siecią a pojazdem (układem ładowania) oraz z przepływem mocy biernej między elementem reaktacyjnym  $L_c$  a układem ładowania pojazdu.

Z zależności (12) wprost wynika, że poza energią czynną (związaną z mocą  $P_s$ ), jaka przepływa między siecią a baterią pojazdu, pojawia się przepływ dodatkowej energii, która jest związana z przesunięciem fazowym prądu względem napięcia na zaciskach łączących układ ładowania z siecią (kąt  $\theta$ ) oraz elementem indukcyjnym  $L_c$ . Amplituda tejże składowej zmiennej zależy w szczególności od odbieranej przez sieć mocy biernej  $Q_s$  i indukcyjności  $L_c$ . Energia ładowania związana ze składową zmienną mocy chwilowej układu ładowania jest magazynowana w pojemności  $C_{dc}$  (rys. 4):

$$(17) \quad E_{ripp} = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} P_{ripp} \cos(2\omega t + \beta) dt =$$

$$= \frac{1}{\omega} \sqrt{S^2 + \left( \omega L_c \frac{S^2}{U_s^2} \right)^2} - 2\omega L_c \frac{S^2}{U_s^2} Q_s$$

$$(18) \quad E_{ripp} = \frac{1}{2} C_{dc} (U_{dc \max}^2 - U_{dc \min}^2)$$

Można pokazać, że wymagana pojemność do zachowania wartości  $U_{dc \max}$  i  $U_{dc \min}$  wynosi [25]:

$$(19) \quad C_{dc} = \frac{\sqrt{S^2 + \left( \omega L_c \frac{S^2}{U_s^2} \right)^2} - 2\omega L_c \frac{S^2}{U_s^2} Q_s}{\omega (U_{dc \max} - U_{dc \min}) U_{dc}}$$

Kondensator  $C_{dc}$  jest ładowany prądem przemiennym o podwojonej częstotliwości sieciowej:

$$(20) \quad i_{cap}(t) = C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = \omega C_{dc} (U_{dc \max} - U_{dc \min}) \cos(2\omega t)$$

Wartość skuteczna prądu ładowania kondensatora  $C_{dc}$  wynosi [25]:

$$(21) \quad I_{cap} = \frac{\sqrt{S^2 + \left( \omega L_c \frac{S^2}{U_s^2} \right)^2} - 2\omega L_c \frac{S^2}{U_s^2} Q_s}{\sqrt{2} U_{dc}}$$

Analizując powyższe zależności, warto zwrócić uwagę, że:

- składowa zmienna mocy chwilowej układu ładowania pojazdu PEV wprowadza drugą harmoniczną do prądu zasilającego układ, związaną z prądem ładowania kondensatora  $C_{dc}$  (20);
- energia składowej zmiennej mocy chwilowej układu zwiększa się wraz ze wzrostem zapotrzebowania na moc bierną ze strony sieci  $-Q_s$ , wzrost tej energii następuje nawet, gdy zachowana zostaje stałość wartości przepływającej mocy pozornej  $S$  (17);
- wzrost energii składowej zmiennej mocy chwilowej układu powoduje zwiększenie napięcia na kondensatorze  $U_{dmax} - U_{dmin}$  (18), a to powoduje zwiększenie prądu jego ładowania (20) i w konsekwencji wzrost udziału drugiej harmonicznej w prądzie układu;
- wymagania co do zakresu dostarczania mocy biernej do sieci należy uwzględnić przy doborze pojemności  $C_{dc}$  (19).

### Podsumowanie

Ewolucja sieci i systemów energetycznych w kierunku rozwiązań inteligentnych wymaga zwiększenia elastyczności w obszarze sieci dystrybucyjnych. Operatorzy tych sieci w celu podwyższenia jakości, efektywności, niezawodności oraz ekonomiki działań, muszą wykorzystywać nowe środki i kreować nowe usługi. W pewnym zakresie, alternatywnym działaniem wobec kosztownych działań modernizacyjnych, może być odpowiednie wykorzystanie potencjału technicznych możliwości elementów instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnych, w zakresie realizacji usług systemowych, w tym np. dostarczania mocy biernej.

Jednymi z elementów nowoczesnego, zrównoważonego systemu elektroenergetycznego w ramach struktury Smart Grid są pojazdy elektryczne. Unia Europejska wspiera rozwój czystej motoryzacji, jako jeden ze środków realizacji celu zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych (np. Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu KOM(2011) 144 *wer. ostat.*, Dyrektywy 2006/32/WE, 2009/33/WE, Plan działania dla przemysłu motoryzacyjnego UE na okres do 2020 r.). Współczesna technika daje możliwości spełniania przez pojazdy elektryczne dwóch funkcji, mianowicie transportowej, a także jako rozszerzenie usługi V2G – dostawcy usług energetycznych na rzecz systemu dystrybucyjnego energii elektrycznej. Jak pokazuje przedstawiony w artykule przegląd stanu wiedzy, możliwe jest również wykonywanie przez pojazdy elektryczne usługi polegającej na regulacji mocy biernej w sieci elektroenergetycznej. Jest to temat stosunkowo nowy, ale już zaczyna być rozwijany w światowej literaturze naukowej.

**Autor:** Dr inż. Sławomir Bielecki,  
 e-mail: [slawomir.bielecki@itc.pw.edu.pl](mailto:slawomir.bielecki@itc.pw.edu.pl)  
 Instytut Techniki Ciepłej im. B. Stefanowskiego,  
 Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika  
 Warszawska, 00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25,

### LITERATURA

- [1] Skoczowski T., Bielecki S.: Konieczność zapewnienia interesów odbiorców końcowych w procesie budowy sieci inteligentnych. *Przeгляд Elektrotechniczny* 1/2015, s.88-94
- [2] Korpiewicz J., Bronk L., Pakulski T.: Capabilities Deliver Ancillary Services Provided by Decentralized Energy Generation. *Acta Energetica* 2/19 (2014), s.70-74
- [3] Bielecki S.: Problematyka rozliczeń za użytkowanie mocy biernej. *Energetyka* Nr 11(737) / Rocznik 68, 2015, s.702-705
- [4] Portużak R.: Opportunities of electric vehicles as a part of smart solutions. *Przeгляд Elektrotechniczny* 11/2013, s.35-38
- [5] Andriukaitis D., Bagdanavicius N., Jokuzis V., Kilius S.: Investigation of Prospects for Electric Vehicle Development in Lithuania. *Przeгляд Elektrotechniczny* 1/2014, s.101-104

- [6] Kempton W., Letendre S.E.: Electric vehicles as a new power source for electric utilities, *Transpn. Res.*, vol. 2, no. 3, 1997, s. 157–175
- [7] Letendre S.E., Kempton W.: The V2G concept: A new model for power? *Public Utilit. Fortnightly*, Feb. 2002, s. 16–26
- [8] Khaligh A. Dusmez S.: Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 8, s. 3475–3489, Oct. 2012
- [9] Musavi F., Edington M., Eberle W., Dunford W. G.: Energy efficiency in plug-in hybrid electric vehicle chargers: evaluation and comparison of front end ac-dc topologies, *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, Phoenix, AZ, USA, Sep. 2011, s. 273–280
- [10] Erb D. C., Onar O. C., Khaligh A.: Bi-directional charging topologies for plug-in hybrid electric vehicles, *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Palm Springs, CA, USA, Feb. 21–25, 2010, s. 2066–2072
- [11] Yilmaz M., Krein P. T.: Review of battery charger topologies, charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 5, s. 2151–2169, May 2013
- [12] Singh B., Singh B. N., Chandra A., Al-Haddad K., Pandey A., Kothari D. P.: A review of single-phase improved power quality ac-dc converters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 5, s. 962–981, Oct. 2003
- [13] Noda T., Kabasawa Y., Fukushima K., Nemoto K., Uemura S.: A method for compensating customer voltage drops due to nighttime simultaneous charging of EVs utilizing reactive power injection from battery chargers, *Electrical Engineering in Japan*, vol. 184, no. 1, s. 19–29, 2013
- [14] Monterio V., J. Pinto G., Exposto B., Goncalves H., Ferreira J. C., Couto C., Afonso J. L.: Assessment of a battery charger for electric vehicles with reactive power control, *Proceedings of 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, s. 5142–5147, 2012
- [15] Guille C., Gross G.: A conceptual framework for the vehicle-to-grid (v2g) implementation, *Energy Policy*, vol. 37, s. 4379–4390, 2009
- [16] Jiang B., Fei Y.: Decentralized scheduling of pev on-street parking and charging for smart grid reactive power compensation, *Proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, s. 1–6, 2013
- [17] Mojdehi M.N., Ghosh P.: Modeling and revenue estimation of EV as reactive power service provider, *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2014, s. 1–5
- [18] Kisacikoglu M., Ozpineci B., Tolbert L.: Examination of a PHEV bidirectional charger system for V2G reactive power compensation, *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Feb. 2011, s. 458–465
- [19] Kisacikoglu M., Ozpineci B., Tolbert L.: Reactive power operation analysis of a single-phase EV/PHEV bidirectional battery charger, *Proc. IEEE Int. Conf. on Power Electronics and ECCE Asia*, June 2011, s. 585–592
- [20] Mojdehi M.N., Ghosh P.: Estimation of the Battery Degradation Effects on the EV Operating Cost During Charging/Discharging and Providing Reactive Power Service. *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 11-14 may 2015, s.1-5
- [21] Mojdehi M.N., Ghosh P.: An On-Demand Compensation Function for an EV as a Reactive Power Service Provider, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, (Volume:PP, Issue: 99), 2015, s.1-12
- [22] Mojdehi M.N., Ghosh P.: Minimization of Energy Usage and Cost for EV during Reactive Power Service. *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 17-19 Aug. 2015, s.1-6
- [23] Farahani H. F., Shayanfar H. A., Ghazizadeh M. S.: Modeling of stochastic behavior of plug-in hybrid electric vehicle in a reactive power market, *Electrical Engineering*, vol. 96, s. 1–13, 2014.
- [24] Zhong J., Bhattacharya K.: Toward a competitive market for reactive power, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, 2002, s 1206–1215
- [25] Kisacikoglu M., Ozpineci B., Tolbert L.: EV/PHEV Bidirectional Charger Assessment for V2G Reactive Power Operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, December 2013, s. 5717-5727