

## ROZWIĄZANIA V2G I G2V JAKO SPOSOBY WYKORZYSTANIA SAMOCHODÓW ELEKTRYCZNYCH DO ZMIANY KSZTAŁTU KRZYWEJ OBCIĄŻENIA DOBOWEGO SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Wiktorja STAHL

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 607 614 293 e-mail: wiktoria.stahl@tlen.pl

**Streszczenie:** Niniejszy artykuł przedstawia wpływ zastosowania rozwiązania G2V oraz V2G na Krajowy System Elektroenergetyczny. Przedstawiono zmiany, jakie mogą zachodzić w kształcie krzywej obciążenia dobowego w zależności od wybranego scenariusza. Strategia G2V pozwala przede wszystkim na zrealizowanie tzw. „wypełniania dolin” czyli zwiększenia obciążenia w okresie doliny nocnej poprzez proces ładowania większej liczby pojazdów w tym okresie. Strategia V2G zezwala zarówno na realizację „wypełniania dolin” oraz „ścinania szczytów”. Samochody elektryczne poprzez oddawanie części energii zgromadzonej w swoich bateriach, spowodowałyby odciążenie systemu elektroenergetycznego w okresie szczytowych obciążeń. Wiąże się to z bardziej efektywnym zwiększeniem obciążenia w okresie doliny nocnej niż przy rozwiązaniu G2V.

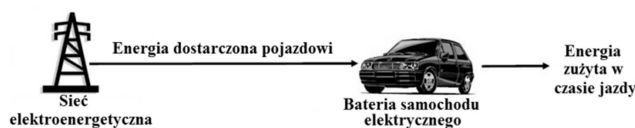
**Słowa kluczowe:** samochody elektryczne, G2V, V2G, bilansowanie systemu elektroenergetycznego.

### 1. IDEA ROZWIĄZAŃ V2G i G2V

Wraz z rozwojem elektromobilności, dostrzeżono wpływ dużej liczby pojazdów elektrycznych na system elektroenergetyczny. Pojazdy podczas podłączenia do stacji ładowania mogą nie tylko pobierać energię z sieci w celu naładowania baterii, ale także oddawać ją do systemu. Rozwiązania pozwalające na zarządzanie procesem ładowania (oraz rozładowywania) baterii samochodów to G2V oraz V2G, które zostały opisane odpowiednio w podpunktach 1.1. oraz 1.2.

#### 1.1. Rozwiązanie G2V

Idea G2V (ang. *Grid-to-Vehicle*) obejmuje jednokierunkowy przepływ energii pomiędzy systemem elektroenergetycznym, a samochodem elektrycznym (rys. 1).



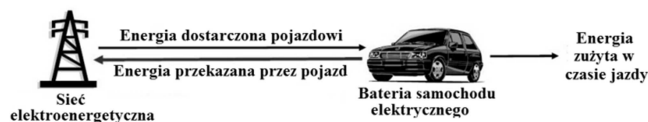
Rys 1. Przepływ energii w ramach V2G [1]

Rozwiązanie G2V dotyczy ładowania samochodu elektrycznego, które odbywałoby się głównie w okresie występowania niskich obciążeń. Zakłada rozłożenie procesu ładowania w czasie, aby nie wywołać gwałtownych wzrostów obciążenia. System ten charakteryzuje się

ograniczonymi możliwościami wpływania na zmianę kształtu krzywej obciążenia dobowego. G2V jest najprostszym sposobem na zintegrowanie samochodu elektrycznego z systemem elektroenergetycznym. Odpowiednie złącza, a także infrastruktura oferująca jednokierunkowy przepływ energii jest powszechnie dostępna na rynku. Rozwiązanie G2V nie wymaga tak zaawansowanych systemów komunikacyjnych z operatorem sieci, bezpieczeństwa, rozliczania, jak system V2G. Cechuje się też niższymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi. [2, 3, 4, 5].

#### 1.2. Rozwiązanie V2G

Rozwiązanie V2G (ang. *Vehicle-to-Grid*) umożliwia dwukierunkowy przepływ energii między systemem elektroenergetycznym, a baterią samochodu elektrycznego (rys. 2). Samochody uczestniczące w strategii V2G pobierałyby energię z sieci w okresach niskiego obciążenia systemu. Natomiast oddawałyby ją w czasie dużego popytu na energię oraz w razie zasygnalizowania takiej potrzeby przez operatora sieci np. w przypadku nagłych wzrostów zapotrzebowania. Wpłynęłyby to pozytywnie na bezpieczeństwo, elastyczność oraz niezawodność systemu elektroenergetycznego.



Rys 2. Przepływ energii w ramach V2G [1]

System V2G wymaga bardziej zaawansowanych rozwiązań technicznych i technologicznych niż system G2V: należałoby opracować i stworzyć złącza oraz infrastrukturę pozwalającą na dwukierunkowy przepływ energii, system komunikacyjny operatora z samochodem. Ważny jest odpowiedni system zachęt, który przekonałby właścicieli pojazdów do uczestniczenia w rozwiązaniu V2G.

Ilość energii będącej do dyspozycji systemu zależy od liczby samochodów elektrycznych podłączonych do ładowarek, których właściciele wyrazili zgodę na sprzedaż energii. System nie może skorzystać z pełnej pojemności baterii, gdyż energia w niej zgromadzona musi pokryć też potrzeby samochodu [6, 7, 8, 9, 10].

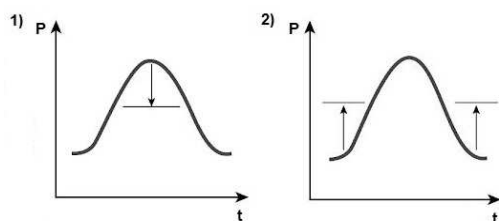
## 2. SPOSOBY KSZTAŁTOWANIA KRZYWEJ OBCIĄŻENIA

Zbliżenie kształtu krzywej obciążenia dobowego do linii prostej, pozwoli w lepszy sposób wykorzystać potencjał systemu elektroenergetycznego. Cel ten osiągnąć można poprzez zastosowanie takich rozwiązań jak „wypełnianie dolin” i „ściananie szczytów” (rys 3). [11, 12].

„Wypełnianie dolin” zakłada wytworzenie dodatkowego, pozaszczytowego obciążenia. Obejmuje zwiększenie poboru energii elektrycznej w nocy, kiedy obciążenie systemu jest niskie [11]. Wariant ten mógłby być realizowany poprzez strategię G2V. Duża liczba samochodów elektrycznych pobierałaby energię w celu ładowania baterii w nocy, kiedy występuje tzw. „dolina”. Wpłynęłoby to zwiększenie obciążenia w tym czasie [12].

„Ściananie szczytów” zakłada redukcję obciążenia w okresie występowania szczytowego zapotrzebowania na energię [11]. Umożliwiłoby to rozwiązanie V2G - samochody elektryczne przekazywałyby do systemu część energii zmagazynowanej w bateriach w czasie występowania najwyższych obciążeń systemu elektroenergetycznego [12].

Strategia V2G oferuje większe możliwości, w zakresie wpływu na zmianę kształtu krzywej obciążenia dobowego. Umożliwiłaby realizację jednocześnie wariantu „wypełniania dolin” oraz „ścianania szczytów”.



Rys 3. Sposoby modyfikowania krzywej obciążenia dobowego  
1) ściananie szczytów, 2) wypełnianie dolin [11]

## 3. BILANSOWANIE SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

W celu przeanalizowania potencjalnego wpływu samochodów elektrycznych biorących udział w strategiach V2G lub G2V na kształtowanie krzywej obciążenia dobowego polskiego systemu elektroenergetycznego, wykonano stosowne obliczenia. Analizowano krzywą przedstawiającą średni dzień roboczy miesiąca stycznia roku 2016. Na potrzeby obliczeń założono, że samochody elektryczne stanowią 5% ogółu zarejestrowanych samochodów w Polsce na rok 2016 (1 084 tys. sztuk). Wykorzystano dane dotyczące obciążenia Krajowego Systemu Elektroenergetycznego z okresu 1.01.2016 – 31.01.2016, zamieszczone na stronie internetowej Polskich Sieci Elektroenergetycznych SA [13]. Przyjęto średnią pojemność baterii samochodu, wynoszącą 30 kWh. Uwzględniono zużycie energii na potrzeby własne pojazdu, które wynosi ok. 4 kWh dziennie. Proces ładowania odbywa się tzw. niską mocą, co opisano w [14].

Odsetek samochodów podłączonych do ładowarek oszacowano w oparciu o badanie dotyczące zachowania właścicieli samochodów zawarte w [4] [15]. Bazując na wynikach tych badań oraz informacjach dotyczących natężenia ruchu drogowego, autorka dostosowała dane w nich zaprezentowane do warunków panujących na terenie Polski. Wynikiem powyższych działań było opracowanie

wartości przedstawionych w tabelicy 1 i tabelicy 2. Przyjęto, że w przypadku obu wariantów (G2V i V2G), w godzinach 00:00 - 5:59 ładuje się 95% samochodów elektrycznych. W godzinach porannych (6:00 – 9:59) następuje stopniowe odłączanie pojazdów od ładowarek. W ciągu dnia energię w celu ładowania pobiera 5% pojazdów (taksówki oraz inne samochody używane w godzinach nocnych). Odsetek samochodów elektrycznych podłączonych do stacji ładowania w kolejnych godzinach jest zależny od rodzaju rozpatrywanego rozwiązania – G2V lub V2G.

### 3.1. Wariant G2V

W przypadku zastosowania G2V użytkownicy pojazdów po dotarciu do miejsca pracy pozostawiają swoje samochody na parkingach, nie podłączając ich do ładowarki. Następnie wracają do domu i zaczynają podłączać pojazdy do ładowarek w godzinach 21:00 – 24:00 - stopniowo zwiększa się liczba pojazdów pobierających energię elektryczną. Pokrywa się to z okresem, gdy obciążenie systemu elektroenergetycznego zmniejsza się. Odsetek samochodów pobierających energię elektryczną w ciągu doby w ramach G2V przedstawia tablica 1.

Tablica 1. Odsetek samochodów elektrycznych pobierających energię z systemu elektroenergetycznego w ramach G2V.

G2V	
Godziny	Odsetek pojazdów [%]
00:00 – 5:59	95
6:00 – 6:59	75
7:00 – 7:59	50
8:00 – 8:59	25
9:00 – 9:59	10
10:00 – 20:59	5
21:00 – 21:59	25
22:00 – 22:59	50
23:00 – 24:00	75

Liczba ładujących się samochodów elektrycznych uczestniczących w G2V, wpływa na wartość obciążenia systemu. Po uwzględnieniu ich potrzeb, obciążenie Krajowego Systemu Elektroenergetycznego wyniesie:

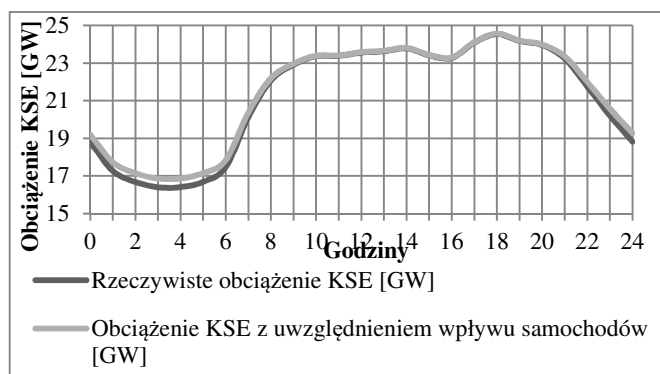
$$P_{G2V} = P_{KSE} + P_{G2Vp} \quad (1)$$

gdzie:  $P_{G2V}$  - obciążenie systemu elektroenergetycznego z uwzględnieniem wpływu samochodów elektrycznych w ramach G2V [GW],  $P_{KSE}$  - obciążenie systemu elektroenergetycznego, bez wpływu samochodów elektrycznych o danej godzinie [GW],  $P_{G2Vp}$  - moc pobrana z systemu przez samochody biorące udział w G2V w celu ładowania [GW].

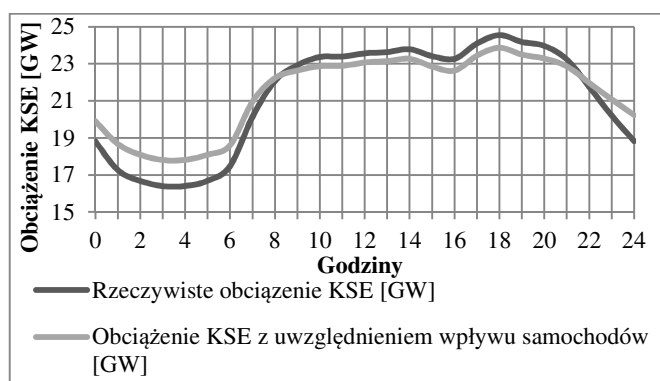
W oparciu o wzór (1) stworzono nową krzywą obciążenia dobowego (rys 4). Energia zawarta w bateriach pojazdów jest zużywana tylko na dojazdy do domu i do miejsca pracy. Dlatego pojazdy wykazują małe zapotrzebowanie na moc w celu ładowania. Efektem jest nieduży wzrost obciążenia w okresie doliny nocnej (24:00 – 5:59). Obciążenie doliny nocnej wzrosło o ok. 0,50 GW w każdej godzinie, co daje łączny wzrost zapotrzebowania o ok. 3 GWh na energię elektryczną w tym czasie.

Widać także nieznaczny wzrost obciążenia w okresie szczytowych obciążeń. Jest on spowodowany ładowaniem części samochodów, które są używane nocą. W okresie szczytowych obciążeń (10:00 – 20:59) zapotrzebowanie na moc wzrosło o ok. 0,02 GW w każdej

godzinie - daje to łącznie ok. 0,30 GWh energii elektrycznej w tym czasie. Łącznie, uwzględniając przedziały czasu, w których zmienia się liczba ładowanych samochodów, zużycie energii wzrośnie o 4,60 GWh w dobie.



Rys 4. Obciążenie systemu elektroenergetycznego w średni dzień roboczy stycznia 2016 roku. Wariant G2V.



Rys 5. Obciążenie systemu elektroenergetycznego w średni dzień roboczy stycznia 2016 roku. Wariant V2G.

### 3.2. Wariant V2G

W przypadku rozwiązania V2G przyjęto, że uczestniczy w nim 40% samochodów spośród samochodów elektrycznych. Użytkownicy samochodów, dojeżdżając do pracy podłączają swoje samochody do ładowarek umożliwiających dwukierunkowy przepływ energii. W godzinach porannych zwiększałby się odsetek samochodów oddających energię do systemu, aż osiągnąłby 40%. Po zakończeniu pracy, samochody zostają odłączane, w celu użycia ich do dojazdu do domu. Właściciele pojazdów po powrocie do domów ponownie podłączają je w celu oddawania energii do sieci. W godzinach 21:00 - 23:59 zwiększa się procent samochodów ładujących się. Odsetek samochodów elektrycznych pobierających lub oddających energię w ramach V2G przedstawia tablica 2.

Liczba samochodów podłączonych do ładowarek, decyduje o wielkości mocy oddawanej lub pobieranej z systemu. Obciążenie systemu elektroenergetycznego w wariantcie V2G będzie wynosiło:

$$P_{V2G} = P_{KSE} + P_{G2Vp} + P_{V2Gp} - P_{praca} - P_{dom} \quad (2)$$

gdzie:  $P_{V2G}$  - obciążenie systemu elektroenergetycznego z uwzględnieniem wpływu samochodów elektrycznych w ramach V2G [GW],  $P_{V2Gp}$  - moc pobrana przez samochody uczestniczące w V2G w celu ładowania [GW],  $P_{praca}$  - moc oddana przez samochody elektryczne w miejscu

pracy [GW],  $P_{dom}$  - moc oddana przez samochody elektryczne w miejscu zamieszkania [GW].

Tablica 2. Odsetek samochodów elektrycznych pobierających lub oddających energię do systemu elektroenergetycznego w ramach V2G

Godziny	V2G		
	Samochody pobierające energię z sieci [%]	Samochody oddające energię w miejscu pracy [%]	Samochody oddające energię w miejscu zamieszkania [%]
00:00 – 5:59	95	-	-
6:00 - 6:59	75	5	-
7:00 – 7:59	50	10	-
8:00 – 8:59	25	25	-
9:00 – 9:59	10	35	-
10:00 – 13:59	5	40	-
14:00 – 14:59	5	35	5
15:00 -15:59	5	25	15
16:00 – 16:59	5	10	30
17:00 – 17:59	5	5	35
18:00 – 19:59	5	-	40
20:00 – 20:59	5	-	35
21:00 – 21:59	25	-	15
22:00 – 22:59	50	-	5
23:00 – 24:00	75	-	-

Wykonanie obliczeń opartych na wzorze (2) pozwoliło stworzyć nową krzywą obciążenia dobowego (rys 5).

Mimo, że scenariusz V2G jest realizowany tylko przez 40% pojazdów, ich wpływ na kształt krzywej obciążenia jest wyraźnie widoczny. Energia zawarta w bateriach pojazdów zostaje nie tylko zużytkowana na potrzeby dojazdów do domu i pracy, ale jest również oddawana do systemu. Dlatego też, samochody uczestniczące w V2G wykazują większe zapotrzebowanie na moc w czasie ładowania niż w przypadku G2V. Efektem jest znaczne zwiększenie obciążenia w okresie doliny nocnej oraz jego obniżenie w czasie szczytowego zapotrzebowania na moc. Obciążenie doliny nocnej (00:00 – 5:59) wzrośnie o ok. 1,40 GW w każdej godzinie, co daje łącznie wzrost zapotrzebowania na energię o ok. 8,40 GWh. Oddawanie energii w okresie szczytowych obciążeń (10:00 – 20:59) powoduje odciążenie systemu elektroenergetycznego - pojazdy oddadzą tym czasie ok. 6,70 GWh energii elektrycznej. Łącznie w dobie, na potrzeby ładowania zostanie pobrane z systemu o 13,20 GWh energii więcej, natomiast oddane zostanie 8,60 GWh energii. Rozwiązanie V2G pozwala na zwiększenie równomierności krzywej obciążenia dobowego. Wraz ze wzrostem liczby samochodów elektrycznych biorących udział w rozwiązaniu V2G, wyrównanie krzywej obciążenia dobowego będzie coraz bardziej widoczne.

## 4. WNIOSKI

Wdrożenie rozwiązania G2V spowoduje zwiększenie obciążenia w okresie doliny nocnej. Problem stanowią pojazdy użytkowane w nocy i podlegające procesowi ładowania w ciągu dnia. Według przeprowadzonych obliczeń, już niewielka liczba pojazdów może zwiększyć obciążenie systemu w okresie szczytowych obciążeń. Dodatkowo, nawet niewielki, wzrost obciążenia systemu w tym czasie, jest niepożądany. Dlatego ważne jest kontrolowanie liczby pojazdów ładujących się w ciągu dnia oraz zachęcanie użytkowników, aby w miarę możliwości ładowali swoje samochody w godzinach pozaszczytowych.

Rozwiązanie V2G niesie ze sobą więcej korzyści dla systemu elektroenergetycznego. Samochody elektryczne biorące udział w strategii V2G charakteryzowałyby głębszy cykl rozładowania baterii. Wiązałoby się to z oddawaniem energii do systemu w ciągu dnia oraz pobieraniem większej ilości energii w okresie doliny nocnej. Jak wykazały przeprowadzone obliczenia, nie wszystkie pojazdy elektryczne muszą uczestniczyć w rozwiązaniu V2G, aby był widoczny jej pozytywny wpływ na system elektroenergetyczny. Już przy 40% pojazdów elektrycznych biorących udział w rozwiązaniu V2G widać duże zmiany w kształcie krzywej dobowego obciążenia systemu elektroenergetycznego. Zaobserwować można lepsze „wypełnienie” doliny nocnej. Natomiast wartości obciążeń szczytowych zmniejszą się. Wpłynie to korzystnie na zrównoważenie obciążenia systemu elektroenergetycznego.

Warto zaznaczyć, że wdrożenie rozwiązania V2G wiąże się z wyższymi kosztami nie tylko inwestycyjnymi, ale też eksploatacyjnymi. W niniejszym artykule nie została przeprowadzona analiza kosztów, ale jest to problem ważny i będzie przedmiotem dalszych badań. Problemem wartym zaznaczenia jest zwiększona intensywność eksploatacji baterii pojazdu poprzez wzrost liczby cykli „ładowanie-rozładowanie” w krótkim czasie. Może to prowadzić do skrócenia czasu ich użytkowania.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Tomić J., Kempton W.: Using electric vehicles for grid-connected storage, W: Energy and Nanotechnology: Storage and the Grid, The Baker Institute at Rice University, USA, Houston, 15-16 listopada 2005.
2. Damiano A., Gatto G., Marongiu I., i inni: Vehicle-to-Grid Technology: State of the Art and Future Scenarios, Journal of Energy and Power Engineering, David Publishing Company, nr. 8, 2014.
3. Monteiro V., Goncalves H., i inni: Batteries Charging Systems for Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, W: Carmo J., Ribeiro J.: New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering, wydawnictwo InTech, Rijeka, 2012.
4. Alonso M., Amaris H., i inni: Optimal Charging Scheduling of Electric Vehicles in Smart Grids by Heuristic Algorithms, Energies, 2014.
5. Gracia-Valle R., Joao A. Pecas L.: Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Springer, Nowy Jork, 2013.
6. Yu R., Zhong W., Xie S., i inni: Balancing Power Demand through EV Mobility in Vehicle-to-Grid Mobile Energy Networks, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 12, 2016.
7. Mullan J., Harries D., Braunl T., i inni: The Technical, Economic and Commercial Viability of the Vehicle-to-Grid Concept, Energy Policy, vol. 48, Elsevier, 2012.
8. Wang Z., Wang S.: Grid Power Peak Shaving and Valley Filling Using Vehicle-to-Grid Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, nr. 3, 2013.
9. Parsons R.G., Hidure K. M., i inni: Can Vehicle-To-Grid Revenue Help Electric Vehicles on the Market?, University of Delaware, 2011.
10. Elektromobilność, pod red. Wójtowicz S., Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Warszawa 2011.
11. Goswami D. Y., Kreith F.: Energy efficiency and renewable energy handbook, wydanie drugie, CRC Press, 2016.
12. Aslam M.: Vehicle to Grid Concept as Part of Power System and Electricity Market, Tampere University of Technology, 2016.
13. Strona Internetowa Polskich Sieci Elektroenergetycznych [dostęp 6.05.2018] - <https://www.pse.pl/obszary-dzialalnosci/krajowy-system-elektroenergetyczny/zapotrzebowanie-kse>
14. Falvo M. C., Sbordone D., Bayram I. S., Devetsikiotis M.: EV Charging Stations and Modes: International Standards, W: 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Włochy, Ischia, 18-20 czerwca 2014
15. Strona Internetowa Hiszpańskiego Ministerstwa Rozwoju [dostęp 10.04.2018] - <https://www.fomento.gob.es/informacion-para-el-ciudadano/informacion-estadistica/movilidad/movilidad-20062007/encuesta-de-movilidad-de-las-personas-residentes-en-espan%CC%83a-movilidad-20062007>

## G2V AND V2G SOLUTIONS AS THE WAYS OF USE ELECTRIC CARS TO CHANGE SHAPE OF DAILY LOAD CURVE OF THE POWER SYSTEM

In this article there were presented an impact of implementing Grid-to-Vehicle (G2V) and Vehicle-to-Grid (V2G) solutions on National Electric Power System. V2G strategy concerns bidirectional energy flow between electric power system and car battery whereas G2V strategy concerns unidirectional energy flow between energy power system and battery of electric car. Both strategies allow changing shape of daily curve of electric power demand in various ways. The changes that took place in the shape of daily electric power demand curve of the power system were shown. The changes were different and depended on the scenario that were applied – G2V or V2G.

G2V solution allowed to realize so called „valley filling”. „Valley filling” were realized by increased the load during the night valley through the process of charging an larger amount of electric vehicles. There were also shown an problem, that is an increased load during peak loads of electric power system. This is caused by small amount of electric cars, that were charged during daytime. Increased load during peak loads could be a problem if there were larger amount of electric cars. This shown that, it is important to convince most of electric cars owners to charge their cars during nighttime.

V2G solution allowed not only for realize „valley filling”, but also „peak clipping”. „Valley filling” in V2G solution were more effective. Electric cars would need more energy from the power system, to charge their batteries. It is a result of transfer a part of energy, that has been magazined in their batteries, to the power system during daytime. This allowed to reduce peak loads of power system and realized so called „peak clipping”. It also allowed to overcome a problem with increased load during peak loads, caused by small amount of charging vehicles.

**Keywords:** electric cars, G2V, V2G, balancing power system.