

Superkondensator jako krótkookresowy magazyn energii dla generatora fotowoltaicznego zasilającego układy wentylacji

Streszczenie. Zwiększenie sprawności układów fotowoltaicznych możliwe jest poprzez wykorzystanie krótkookresowych magazynów energii w postaci baterii superkondensatorów. W celu sprawdzenia wyżej wymienionego założenia opracowano układ sterowania silnikiem prądu stałego, zasilanego z generatora fotowoltaicznego. Pomiar wykazały, że zaproponowany układ poprawia pracę silnika, umożliwiając jego start przy niższej wartości nasłonecznienia i zwiększa efektywność energetyczną systemu wentylacyjnego.

Abstract. Increasing the efficiency of photovoltaic systems is possible by using short-term energy storage in the form of supercapacitors. In order to check the aforementioned assumption, a control system for a DC motor powered by a photovoltaic generator has been developed. The measurements showed that the proposed system improves the engine's operation, allowing it to start at a lower solar exposure and increases the energy efficiency of the ventilation system.

(The supercapacitor as a short-term energy storage for a photovoltaic generator supplying ventilation systems).

Słowa kluczowe: układ fotowoltaiczny, superkondensator, efektywność energetyczna, system wentylacji.

Keywords: photovoltaic system, supercapacitor, energy efficiency, ventilation system.

Wstęp

Doświadczenia ostatnich lat potwierdzają wpływ efektu cieplarnianego na zmiany klimatyczne na świecie. Są one również odczuwalne na terenie Polski. Można na przykład zaobserwować, że w coraz większym stopniu okresy letnie wiążą się z utrzymywaniem wysokich temperatur. Równoległe z tym procesem rozwija się trend do poprawy dobrostanu bytu człowieka. Tu główną rolę odgrywa dobre samopoczucie psychofizyczne. Jednym ze składników jakości jest stan mikroklimatu pracy czy odpoczynku. Czynnikiem warunkującym dobre samopoczucie jest utrzymywanie odpowiedniej temperatury, wilgotności i napowietrzenia otoczenia człowieka. Obecnie tym wymaganiom starają się sprostać układy klimatyzacji i wentylacji pomieszczeń. Jednak praca dużej liczby tych układów wymaga dostarczenia dużej ilości energii elektrycznej. Stawiane tym urządzeniom odpowiednie wymagania związane z efektywnością energetyczną powodują poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych ich budowy, albo pozyskiwania dodatkowych źródeł energii. Najczęstszym alternatywnym źródłem energii jest energia promieniowania słonecznego. Dodatkowym atutem do korzystania z tej formy energii odnawialnej jest korelacja pomiędzy czasem wykorzystania zasilanego urządzenia i okresem operacji Słońca nad horyzontem Ziemi. Z tego typu koordynacją mamy do czynienia w układach pompowym lub wentylacji zasilanych z generatora fotowoltaicznego [1], [2]. Niestety chwilowe wahania nasłonecznienia związane z zachmurzeniem powodują nierównomierność pracy układów wentylacji. Ponadto układ bardzo często wypada z ustalonego punktu pracy przy mocy maksymalnej układu fotowoltaicznego, a tym samym zmniejszeniu ulega sprawność przetwarzania energii. Stąd częstym sposobem poprawy tej sytuacji jest stosowanie rezerwowego źródła energii w postaci akumulatorów. Jeżeli zapotrzebowanie na energię idzie w parze z nasłonecznieniem (np. w przypadku niektórych urządzeń nawadniających, wentylacyjnych itp.) a dodatkowo nie ma konieczności zasilania odbiornika w nocy, to celowe jest zastosowanie systemu bez baterii akumulatorów [3]. W tych rozwiązaniach poprawę efektywności pracy układu można uzyskać poprzez zastosowanie superkondensatorów, które mogą być wykorzystane jako krótkookresowy magazyn energii [4], [5].

Superkondensator

Superkondensator przechowują energię w postaci elektrochemicznej poprzez rozdzielanie nośników ładunku pomiędzy dwiema porowatymi elektrodami węgla aktywnego, które mają dużą powierzchnię oddzieloną przez ciekłą warstwę separatora. W przeciwieństwie do baterii elektrochemicznych mogą wytrzymać setki tysięcy cykli ładowania. Elektryczne kondensatory dwuwarstwowe oferują energię 7Wh kg^{-1} i gęstość mocy do 3 kW kg^{-1} [6]. W systemach fotowoltaicznych można je wykorzystać do krótkotrwałego magazynowania energii. Przy użyciu prostego kontrolera przełączania, zastosowanie superkondensatorów może rozszerzyć działanie systemu na niskie okresy napromieniowania. W tym trybie pracy, gdy napięcie superkondensatora spadnie poniżej wcześniej zadanego poziomu, obciążenie będzie odłączone. Umożliwi to generatorowi PV ładowanie kondensatora. Gdy napięcie wzrasta powyżej określonego poziomu obciążenie zostaje ponownie podłączone. Takie rozwiązanie zapewnia utrzymanie odpowiedniego poziomu napięcia do zasilania urządzenia przy niskim napromieniowaniu słonecznym.

Inną korzyścią może być osiągnięcie poziomów napięcia przełączania obciążenia w pobliżu maksymalnych punktów mocy generatora fotowoltaicznego dla szerokiego zakresu poziomów promieniowania słonecznego. W ten sposób superkondensator i kontroler przełączający mogą odgrywać podobną rolę jak kontroler MPPT ze stałą metodą śledzenia napięcia. Jednak jeśli napięciowe charakterystyki sprawności obciążenia nie są liniowe, to najkorzystniejsze napięcie dla generatora fotowoltaicznego może być w zakresie niższej efektywności obciążenia.

System generator fotowoltaiczny – układ wentylacji

Charakterystyka prądowo - napięciowa modułu jest jednym z ważniejszych czynników, który decyduje o jego właściwościach. Jej znajomość jest niezbędna przy analizowaniu właściwości różnych konfiguracji systemów fotowoltaicznych oraz przy ich projektowaniu. Moduły fotowoltaiczne charakteryzują się nieliniową charakterystyką prądowo - napięciową stąd ważnym zagadnieniem jest ich prawidłowy dobór do efektywnej współpracy z zasilanymi urządzeniami. Moc produkowana przez system fotowoltaiczny w znacznym stopniu zależy od charakterystyki prądowo - napięciowej odbiornika. O ile w przypadku odbiornika o charakterze rezystancyjnym stosunkowo łatwo jest dobrać wartość rezystancji najlepiej

dopasowanej do zestawu modułów PV dla żadanego zakresu nasłonecznienia, to dla odbiornika w postaci silnika prądu stałego sprzęgniętego z maszyną roboczą zagadnienie to znacznie się komplikuje. Charakterystyka prądowo - napięciowa takiego silnika zależy nie tylko od jego parametrów, ale w znacznym stopniu jest determinowana przez charakterystykę $T_M=f(\omega)$ maszyny roboczej. Ta charakterystyka z kolei zwykle zależy od dodatkowych parametrów, np. od średnicy rurociągu oraz sprawności układu wentylacji. Niestety sprawność ta nie jest stała lecz zależy od wielu czynników m.in. przepływu. W praktyce na podstawie danych katalogowych przebieg charakterystyki $T_M=f(\omega)$ wentylatora możemy jedynie oszacować.

Sprawność systemu

Sprawność systemu jako całości jest określana dla rozpatrywanego przedziału czasu T jako stosunek energii dostarczonej do odbiornika do energii promieniowania padającego na powierzchnię generatora [7]:

$$(1) \quad \eta_c = \frac{\int_0^T P_o dt}{A_{PV} \int_0^T S_\beta dt}$$

gdzie: η_s – sprawność systemu, P_o – moc dostarczona do odbiornika, A_{PV} – powierzchnia generatora fotowoltaicznego, S_β – moc promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię modułu (ustawioną pod kątem β).

Sprawność systemu η_s uwzględnia sprawność konwersji fotowoltaicznej, pracę generatora przy napięciu różnym od napięcia maksymalnej mocy, straty energii przy ładowaniu i rozładowywaniu rezerwowego zasobnika energii.

Modelowanie pracy układu zasilanego z generatora fotowoltaicznego współpracującego z baterią superkondensatorów

W Katedrze Podstaw Techniki Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie były prowadzone prace badawcze nad modelowaniem współpracy układu fotowoltaicznego z baterią superkondensatorów [8]. Analizie poddany został układ zasilania bezszczotkowego silnika prądu stałego zasilającego pompę wodną. Do analizy przyjęto uproszczone algorytmy przepływu energii [9], [10] oraz pięcioparametrowy model generatora słonecznego [11].

Wyniki przeprowadzonych analiz z wykorzystaniem programu Simulink pokazały, że zastosowanie układu MPPT poprawia warunki pracy układu, pozwalając na rozruch pompy przy niższych wartościach poziomu napromieniowania słonecznego i przepompowanie wody na wyższe poziomy, szczególnie w pochmurny dzień.

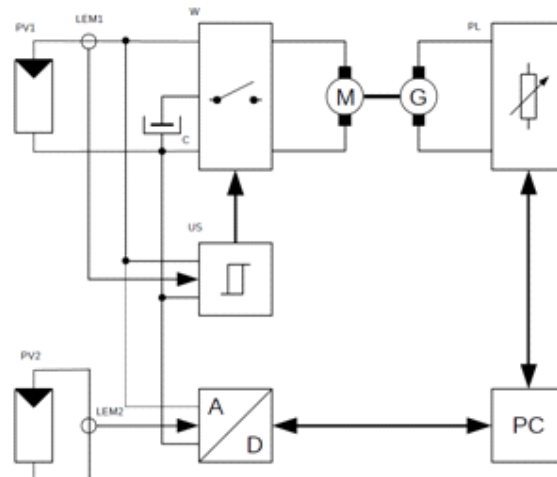
Te badania dały asumpt do rozważenia problemu zastąpienia układów MPPT przez superkondensatory. Pilotażowe badania symulacyjne oraz badania innych autorów [12], [13], [14], [15], [16] potwierdziły możliwość zastosowania takiego rozwiązania.

Badania

Stanowisko badawcze

W celu weryfikacji przyjętej hipotezy, że układ baterii superkondensatorów może skutecznie zastąpić system śledzenia najwyższej mocy generatora fotowoltaicznego, w Zakładzie Elektrotechniki i Systemów Sterowania UP w

Lublinie zaprojektowano układ badawczy. Jego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Układ zasilany jest z panelu fotowoltaicznego PV1. Zamontowany jest on na stałe w kierunku południowym, przy nachyleniu płaszczyzny 45° . Take samo ustawienie ma dodatkowe ogniwo fotowoltaiczne PV2 pozwalające mierzyć poziom nasłonecznienia. Pomiar natężenia prądu i napięcia elektrycznego paneli wykonywany jest przy wykorzystaniu przetworników, odpowiednio LEM1 i LEM2. Stanowisko pozwala na bezpośrednie zasilanie układu napędowego lub z dołączoną baterią superkondensatorów C. Dołączanie baterii kondensatorów do układu zasilania umożliwia układ załączania W, który może być sterowany ręcznie lub poprzez układ sterujący US według zadanego algorytmu. Energia z panela fotowoltaicznego zasila silnik M. Obciążony jest on sprzężoną mechanicznie za pomocą sztywnego wału prądnicą G. Układ napędowy posiada możliwość modelowania charakterystyki obciążenia, poprzez zadanie stałych lub zmiennych parametrów pracy. Do zmiany charakterystyki wykorzystywane jest regulowane obciążenie PL. Sterowanie charakterystyką wykonywane jest według programu zapisanego w środowisku LabView Program ten pozwala równocześnie mierzyć i zapisywać wartości obciążenia elektrycznego. Nasłonecznienie mierzone jest przez układ zbudowany z przetworników pomiarowych LEM i poprzez kartę pomiarową A/D zmierzona wartość przenoszona jest do plików archiwizowanych w komputerze PC.

Metodyka badań

Badania prowadzone były w warunkach rzeczywistego nasłonecznienia. Warunki te charakteryzuje zmienność chwilowej wartości insolacji, wynikająca z warunków pogodowych, takich jak zachmurzenie. Chcąc osiągnąć porównywalność wyników badań pomiary były grupowane w przedziały 20 minutowe, dla których wyznaczano wartość docierającej energii promieniowania słonecznego (2) i wartość uzyskanej energii mechanicznej (3):

$$(2) \quad E_s = \sum_{i=1}^{1200} S_i t$$

gdzie: E_s – energia promieniowania słonecznego docierającego do panela fotowoltaicznego [J], S_i – moc promieniowania słonecznego docierającego do panela fotowoltaicznego w chwili pomiaru [W], t – jednostkowy przedział czasu pomiaru [s],

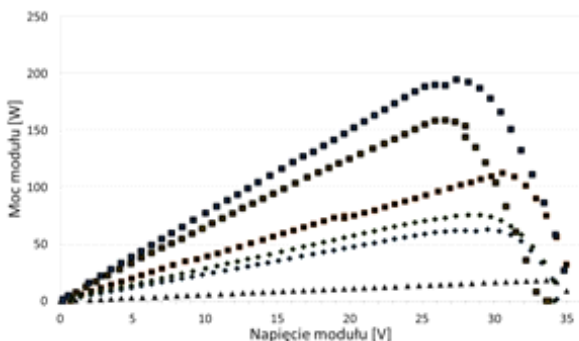
$$(3) \quad E_m = \frac{\sum_{i=1}^{1200} (P_m)_i t}{\eta_g} = \frac{\sum_{i=1}^{1200} U_i I_i t}{\eta_g}$$

gdzie: E_m – energia mechaniczna wytworzona przez układ napędowy [J], $(P_m)_i$ – moc mechaniczna układu napędowego w chwili pomiaru [W], t – jednostkowy przedział czasu pomiaru, U_i – napięcie generowane w prądnicie G w czasie pomiaru, I_i – natężenie prądu elektrycznego pobieranego z prądnicy G w czasie pomiaru.

Badania zostały przeprowadzone w dwóch trybach pracy:

- bez dołączonego superkondensatora,
- z superkondensatorem dołączanym do układu zasilania jeżeli napięcie na kondensatorze zawiera się w przedziale $\langle U_w; U_z \rangle$.

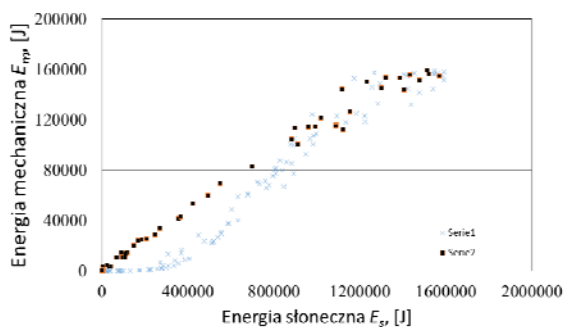
W celu określenia przedziału pracy w trybie pomiarów (b) wyznaczono charakterystyki zewnętrzne wykorzystywanego panelu słonecznego w różnych warunkach nasłonecznienia. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Charakterystyka mocy panelu fotowoltaicznego przy różnych warunkach nasłonecznienia

Przeprowadzona analiza mocy maksymalnej uzyskiwanej z zastosowanego panelu fotowoltaicznego pozwoliła ustalić granice pracy baterii kondensatorów zasilających układ napędowy. Przyjęto, że bateria będzie odłączana od układu jeżeli napięcie na niej występujące obniży się do wartości poniżej $U_w = 25V$. Ponowne dołączenie do układu zasilania następuje, gdy napięcie na baterii kondensatorów wzrośnie do poziomu $U_z = 30V$. Taki dobór napięć pracy pozwala na wykorzystanie maksymalnej mocy generowanej w układzie fotowoltaicznym.

W trakcie pomiarów utrzymywano charakterystykę obciążenia odpowiadającą pracy układów wentylacyjnych.
Wyniki badań



Rys.3. Charakterystyka zależności uzyskanej mocy mechanicznej E_m od docierającej do generatora fotowoltaicznego energii promieniowania słonecznego E_s w trybie pracy bez superkondensatorów (Serie 1) i z superkondensatorami (Serie 2)

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono ilość docierającej energii słonecznej do układu fotowoltaicznego oraz ilość uzyskanej energii mechanicznej układu napędowego. Obliczenia przeprowadzono na podstawie zależności (2) i zależności (3).

Wyniki tych obliczeń pozwoliły na wykreślenie charakterystyk zależności uzyskanej mocy mechanicznej w zależności od docierającej energii słonecznej $E_m = f(E_s)$. Tę zależność dla obu trybów pracy przedstawiono na rys. 3.

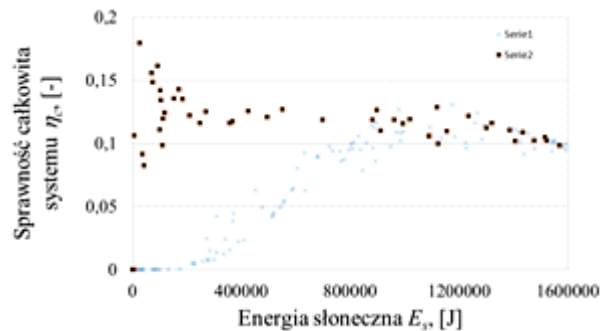
Ważnym zagadnieniem badań jest efektywność energetyczna procesu przemian. Powiązana jest ona ze sprawnością całkowitą przetwarzania.

Sprawność całkowitą przetwarzania wyznaczana jest przy uwzględnieniu poszczególnych energii chwilowych otrzymanych w przedziałach 20-minutowych pomiarów:

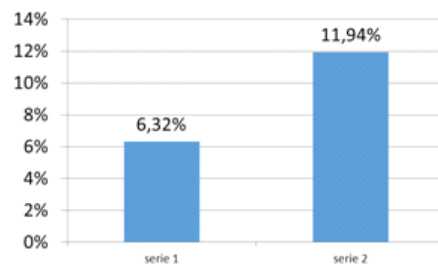
$$(4) \quad \eta_{ci} = \frac{E_{mi}}{E_{si}}$$

gdzie: E_{mi} – energia mechaniczna uzyskana w i-tym przedziale pomiarowym, E_{si} – energia słoneczna docierająca do panela fotowoltaicznego w i-tym przedziale pomiarowym

Zależność zmian sprawności całkowitej od przetwarzanej energii słonecznej $\eta_c = f(E_s)$ przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Charakterystyka zależności całkowitej sprawności układu generatora fotowoltaicznego – napęd wentylatora η_c od docierającej do generatora fotowoltaicznego energii promieniowania słonecznego E_s w trybie pracy bez superkondensatorów (Serie 1) i z superkondensatorami (Serie 2)



Rys. 5. Wartości średniej sprawności całkowitej dla trybu pracy bez superkondensatora (serie 1) i z superkondensatorem (serie 2)

Dodatkowo wyznaczono uśrednioną wartość sprawności konwersji energii słonecznej na energię mechaniczną dla obu trybów pracy w odniesieniu do całego okresu pomiarów. Uśrednioną wartość sprawności wyznaczono na podstawie zależności:

$$(5) \quad \eta_{cs} = \frac{E_{mc}}{E_{sc}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{mi}}{\sum_{i=1}^n E_{si}}$$

gdzie: E_{mc} – energia mechaniczna uzyskana w ciągu całego okresu pomiarów, E_{sj} – energia słoneczna docierająca do panela fotowoltaicznego w ciągu całego okresu pomiaru.

Otrzymane wartości sprawności całkowitej dla obu trybów pracy badanego układu przedstawiono na rysunku 5.

Omówienie wyników badań

Zestawienie zmian 20-minutowych energii układu generatora fotowoltaicznego – układ napędowy pokazuje, że w układzie pracy z dołączonym kondensatorem już niewielkie nasłonecznienie, przy którym dostarczona ilość energii wynosi ok. 10 kJ istnieje możliwość uruchomienia napędu wentylatora. Natomiast załączenie do pracy układu wentylacyjnego przy dołączeniu układu generatora słonecznego bez współpracy z superkondensatorami wymaga dostarczenia energii słonecznej w ilości wynoszącej co najmniej 380 kJ. Przewaga układu z dołączoną baterią superkondensatorów przy wytwarzaniu energii mechanicznej obserwowana jest do wartości 920 kJ docierającej ilości energii słonecznej. Powyżej tej wartości oba tryby pracy generują porównywalną ilość energii mechanicznej.

Podobne zakresy zmian obserwowane są w przypadku sprawności całkowitej badanego układu. Dla obu badanych trybów pracy, powyżej 920 kJ energii słonecznej sprawność stabilizowała się początkowo na poziomie 12%, by w dalszej części osiągnąć poziom 10%.

Natomiast dla układu pracy z superkondensatorami w zakresie energii słonecznej od 10 kJ do 920 kJ obserwowane są zmiany sprawności w granicach 17% - 12%. Największą sprawność badanego układu fotogenerator-napęd uzyskano przy niskich wartościach nasłonecznienia. Miały na to wpływ możliwości gromadzenia energii w superkondensatorze i przekazanie nagromadzonego ładunku w późniejszym okresie wykorzystania energii. Był to zatem efekt skumulowanego wykorzystania energii bieżąco dostarczanej do układu oraz energii zgromadzonej we wcześniejszym okresie pomiarowym.

W przypadku układu pracy bez baterii superkondensatorów w przedziale energii słonecznej 380 kJ – 920 kJ sprawność wzrasta od 0 do 12%. W tym przedziale usłonecznienia charakterystyka ma charakter liniowy wprost proporcjonalny.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły założenie, że dołączenie do układu zasilania superkondensatorów poprawia charakterystykę pracy układu generatora fotowoltaicznego – układ napędowy.

Zastosowanie superkondensatorów z kluczem przełączającym dołączenie i odłączenie baterii w układzie zasilania może zastąpić układ śledzenia maksymalnej mocy generatora fotowoltaicznego MPPT.

Dołączenie superkondensatorów pozwala wykorzystać niższe nasłonecznienie do chwilowego załączenia współpracującego układu napędowego wentylatora.

Układ z dołączonym superkondensatorem stabilizuje charakterystykę pracy układu napędowego, łagodząc chwilowe wahania nasłonecznienia wynikające z warunków zachmurzenia.

Magazynowanie w superkondensatorze energii elektrycznej pozyskanej z generatora fotowoltaicznego pozwala zwiększyć prawie dwukrotnie średnią sprawność konwersji energii.

Uzyskana średnia sprawność badanego układu generatora fotowoltaicznego – układ napędowy wentylatora wynosi poniżej 12%. Główny wpływ na ten wynik ma niska sprawność konwersji fotowoltaicznej w fotoogniwie.

Autorzy: dr inż. Marek Ścibisz (autor korespondencyjny), Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, E-mail: marek.scibisz@up.lublin.pl; dr inż. Piotr Makarski, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, E-mail: piotr.makarski@up.lublin.pl; dr hab. inż. Jacek Kapica, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, E-mail: jacek.kapica@up.lublin.pl

LITERATURA

- [1] Mahmoud M., Elkholy, Fathy A., Optimization of a PV fed water pumping system without storage based on teaching-learning-based optimization algorithm and artificial neural network, *Solar Energy*, 139 (2016), 199-212
- [2] Sontake V.C., Vilas R., Kalamkar, Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 59 (2016), 1038-1067
- [3] Mokeddem A., Midoun A., Kadri D., Hiadsi S., Raja I.A., Performance of a directly-coupled PV water pumping system, *Energy Conversion and Management*, 120 (2016), 430 – 448
- [4] Pleßmann G., Erdmann M., Hlusiak M., Breyer C., Global Energy Storage Demand for a 100% Renewable Electricity Supply, *Energy Procedia*, 46 (2014), 22-31
- [5] Narayanan R., Kumar P.N., Deepa M., Srivastava A.K., Combining Energy Conversion and Storage: A Solar Powered Supercapacitor, *Electrochimica Acta*, 178 (2015), 113-126
- [6] Mozaffari Niapour A.A.K., Tabarraie M., Feyzi M.R., A new robust speed-sensorless control strategy for high-performance brushless DC motor drives with reduced torque ripple, *Control Eng. Pract.*, 24 (2017), 42-54
- [7] Cabrance Z., Ouassaid M., Maaroufi M., Analysis and evaluation of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for photovoltaic installation, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41, (2016), 20897-20907
- [8] Kapica J., Small scale stand-alone photovoltaic pumping system with brushless DC motor for irrigation in agriculture, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9, 063503 (2017), 1-11
- [9] Bounechba H., Bouzid A., Sunani H., Lashab A., real time simulation of MPPT algorithms for PV energy system, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 83 (2016), 67-78
- [10] Verma D., Nema S., Shandilya A.M., Dash S.K., Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 54, (2016), 1018-1034
- [11] De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A., Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, *Sol. Energy*, 80 (2006), 78-88
- [12] Atmaja T.D. Amin., Energy Storage System Using Battery and Ultracapacitor on Mobile Charging Station for Electric Vehicle, *Energy Procedia*, 68 (2015), 429-437
- [13] Benyahia N., Denoun H., Zaouia M., Tamalouzt S., Bouheraoua M., Benamorouche N., Rekioua T., Haddad S. Characterization and Control of Supercapacitors Bank for Stand-Alone Photovoltaic Energy, *Energy Procedia*, 42 (2013), 539-548
- [14] Djellad A., Logerais P.O., Omeiri A., Riou O., Durastanti J.F., An energy storage algorithm for ramp rate control of utility scale PV (photovoltaics) plants, *Energy*, 39 (2014), 15169-15177
- [15] van Haaren R., Morjaria M., Fthenakis V., Optimization of the energy transfer in a system combining photovoltaic source to ultracapacitors, *Int. J. Hydrogen Energy*, 91 (2015), 894-902
- [16] Martin I.S., Ursua A., Sanchis P., Integration of fuel cells and supercapacitors in electrical microgrids: Analysis, modelling and experimental validation, *Int. J. Hydrogen Energy*, 38 (2013), 11655 – 11671