

Jan Popczyk, Marcin Zygmanski, Jarosław Michalak, Paweł Kielan, Marcin Fice

Koncepcja prosumenckiej mikroinstalacji energetycznej (PME) wg iLab EPRO

Wprowadzenie

Celem opracowania jest utworzenie jednolitej koncepcji instalacji energetycznej dla obiektu prosumenckiego oraz uniwersalnej w stosowaniu. Koncepcja PME bazuje na możliwości uniwersalnego wykorzystania proponowanych rozwiązań w warstwach: zasilania (instalacja elektryczna, inteligentny przekształtnik energoelektroniczny), pomiarowej (inteligentne liczniki elektroniczne, liczniki obiektowe) i sterowania (inteligentne sterowniki mikroprocesorowe, komunikacja, zarządzanie, grafikowanie lokalne). W niniejszym opracowaniu wprowadza się definicję licznika inteligentnego jako połączenie licznika energii z dwukierunkową transmisją danych (Smart-grid) z nadrzędnym urządzeniem zarządzającym/sterującym przepływem energii w budynku. Rozłączenie warstw licznikowej i sterującej ma znaczenie funkcjonalne.

Instalacja PME charakteryzuje się możliwością interaktywnej współpracy z systemem elektroenergetycznym (smart-grid) integrując na poziomie instalacji lokalnej (budynku) wszystkie warstwy (zasilania, pomiarową i sterowania). Funkcjonalność PME oprócz wykorzystania energooszczędnych technologii oraz źródeł odnawialnych musi także zapewnić komfort użytkownika. Zastosowanie nowoczesnych technologii energooszczędnych oraz możliwości zarządzania źródłami i odbiornikami w trybie inteligentnym pozwoli na zautomatyzowanie w szerokim zakresie obszarów przebywania użytkowników budynku optymalizując zużycie energii, pozostawiając użytkownikowi oczywiście możliwość modyfikowania programów sterowania na własne potrzeby.

Podstawowe funkcje PME dla budynków (ze względu na uniwersalność PME instalacja nie musi posiadać pełnej, podanej niżej funkcjonalności):

- zasilanie z odnawialnych źródeł energii,
- możliwość sprzedaży energii elektrycznej,
- integracja poziomów napięć i mocy OZE w jednym punkcie (inteligentny przekształtnik, inna nazwa to interfejs sieciowy),
- wydzielone instalacje elektryczne o napięciach dopasowanych do odbiorników (głównie wydzielenie instalacji DC),
- sterowanie obiektowe (rozproszone) odbiornikami energii elektrycznej (dotyczy głównie odbiorników dużej mocy w strukturze budynku oraz dla których istnieje uzasadnienie sterowania zdalnego/inteligentnego),
- możliwość całkowitego odłączenia od sieci zewnętrznej i utworzenia lokalnej sieci autonomicznej (praca autonomiczna i awaryjna),
- dwukierunkowa energetycznie współpraca z zasobnikiem energii samochodu elektrycznego,
- sieć HAN (Home Area Network) (różne technologie komunikacji, w tym bezprzewodowe, zależne od zastosowanych urządzeń),
- podliczniki dla mediów (energia elektryczna, ciepło, gaz, woda),

- główny licznik energii (może być zintegrowany z centralnym układem zarządzania/sterowania) z koncentratorem danych (z podliczników) i komunikacją dwukierunkową (współpracujący ze Smart-grid),
- centralny układ zarządzania/sterowania współpracujący z podlicznikami elektronicznymi (fizycznie może być to jedno urządzenie zintegrowane z głównym licznikiem inteligentnym, odbierającym dane o zużyciu mediów z podliczników).

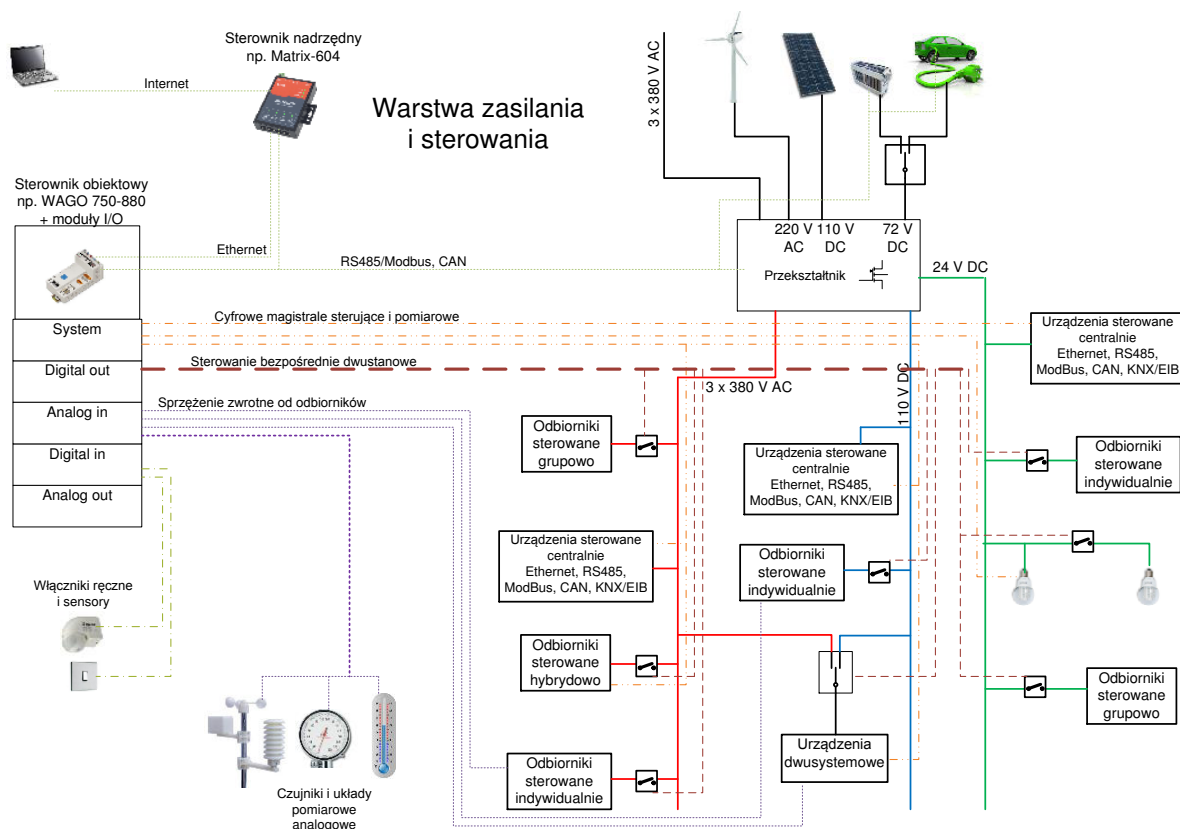
Schemat technologiczny PME

Schemat technologiczny budynku z PME, dla ograniczenia ilości połączeń oraz czytelności, został podzielony na dwa segmenty:

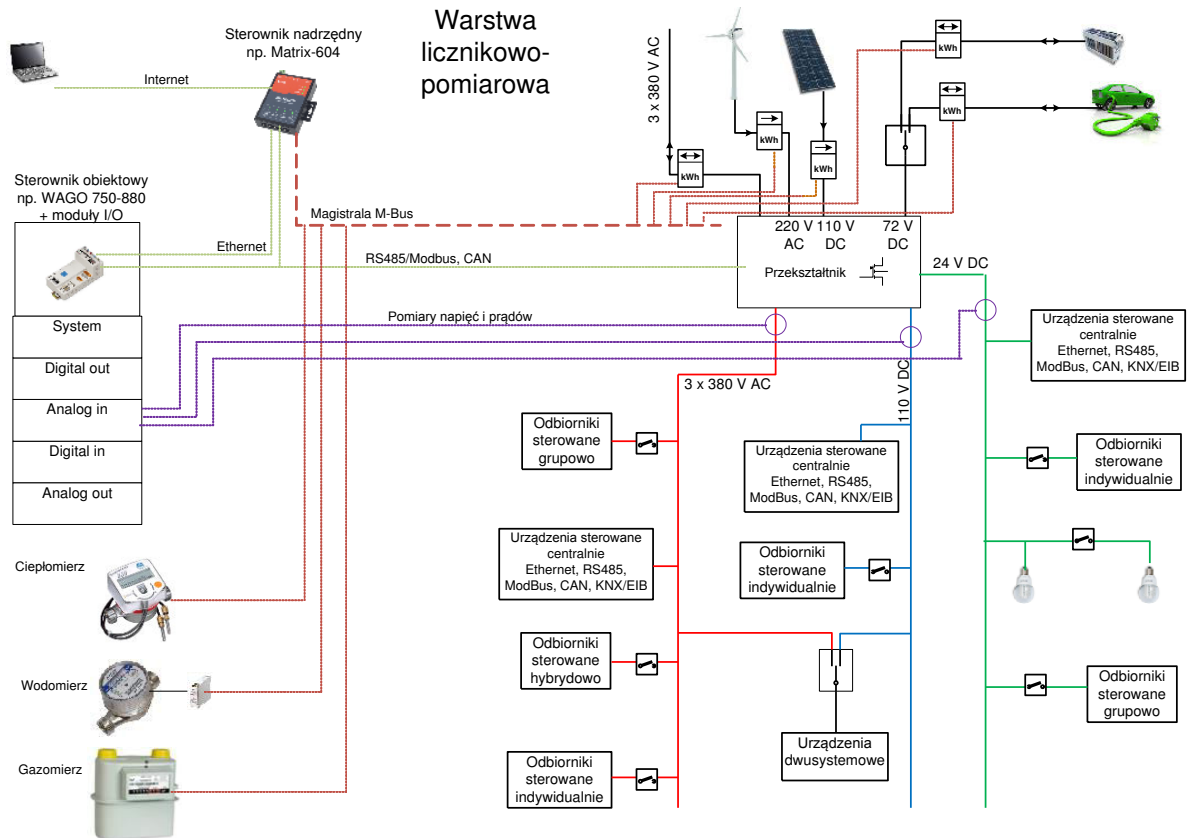
- warstwy zasilania i sterowania,
- warstwa licznikowo-pomiarowa (a właściwie także warstwa zasilania, bez której układ pomiarowy traci czytelność).

Podana propozycja jest strukturą bazową z podkreśleniem uniwersalności. W podanej strukturze zastosowane technologie zasilania, transmisji danych jak i licznikowo-pomiarowe mają charakter ogólny. O zastosowaniu konkretnej technologii decyduje wiele czynników. Podstawowe to: rozległość instalacji (transmisja kablowa czy bezprzewodowa), protokoły transmisji (zależne od zastosowanych urządzeń, bezpieczeństwa, kosztów interfejsów komunikacyjnych), technologie OZE, moc zainstalowana i użytkowa (moc przekształtnika, moduły przekształtnika).

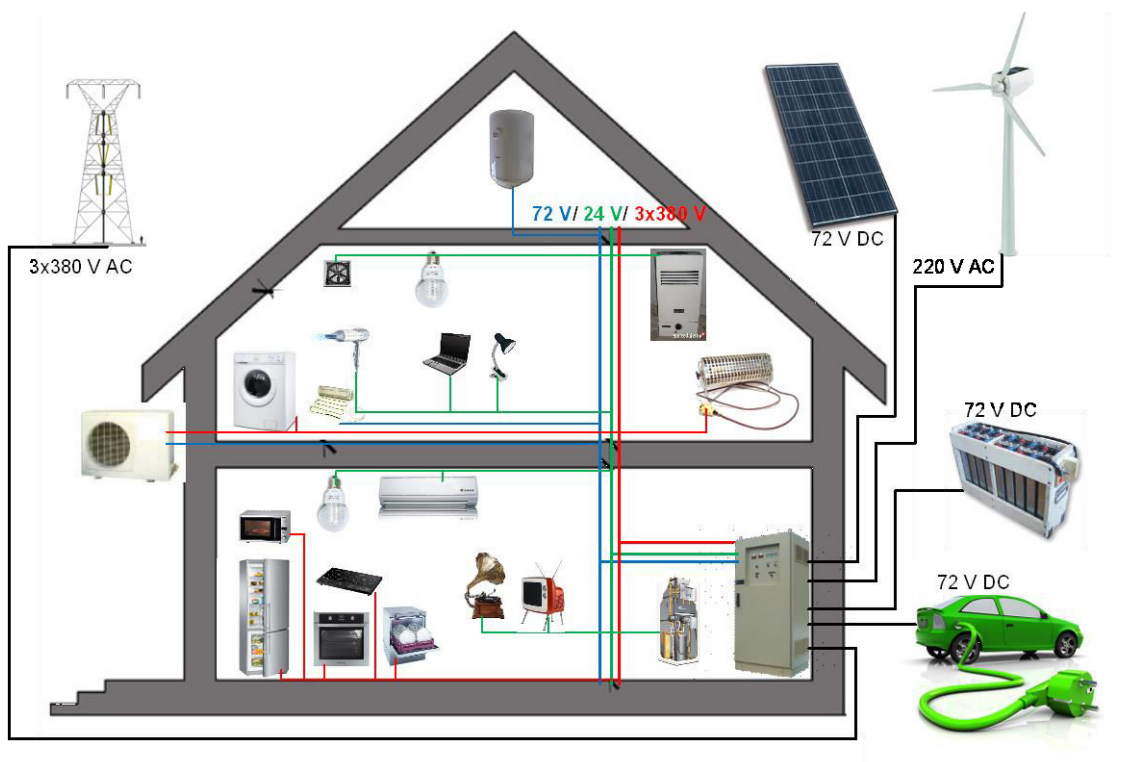
Na rysunku 1 pokazano warstwy zasilania i sterowania schematu technologicznego, na rysunku 2 pokazano warstwę licznikową, a na rysunku 3 schemat funkcjonalny PME.



Rys. 1. Schemat technologiczny PME – warstwy zasilania i sterowania.



Rys. 2. Schemat technologiczny PME – warstwa licznikowo-pomiarowa.



Rys. 3. Schemat technologiczny PME – przykład funkcjonalny.

Warstwa zasilania

Centralnym punktem warstwy zasilania jest przekształtnik inteligentny (interfejs sieciowy) integrujący oraz unifikujący parametry sieci zasilającej dla źródeł energii elektrycznej oraz odbiorników. Źródłami energii elektrycznej, dla instalacji prosumenckiej są, oprócz zasilania z sieci elektroenergetycznej, wszelkie odnawialne źródła energii elektrycznej. Każde OZE w sieci prosumenckiej może charakteryzować się (i najczęściej tak jest) innymi parametrami napięcia wyjściowego.

Dla ogniw fotowoltaicznych (PV) jest to napięcie stałe (DC) w zakresie od 12 V do nawet 500 V. W przypadku współpracy z falownikami i oddawaniem energii do sieci prądu przemiennego trójfazowego napięcie całego zespołu PV jest wyższe (nie produkuje się pojedynczych modułów PV na napięcia wyższe niż 48 V, panele łączy się szeregowo). Napięcie to głównie zależy od zastosowanej techniki podłączenia do sieci lokalnej oraz wykorzystania energii, a także mocy zespołu paneli PV- współpraca z akumulatorami bądź z siecią lokalną AC poprzez falownik).

Mikroturbiny wiatrowe, zależnie od mocy, mają generatory pracujące z napięciem od 12 V do 3x400 V prądu przemiennego (stosuje się, zależnie od mocy, prądnice synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi SGPM - mniejsze moce, bądź tradycyjne generatory synchroniczne z regulacją wzbudzenia SG - większe moce). Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi mniejszej mocy, pracujące na sieć wydzieloną wymagają zastosowania układu dopasowania napięcia prądnicy do parametrów sieci zasilającej. W przypadku współpracy z siecią prądu stałego wystarczy zastosowanie prostownika (lecz wówczas wartość napięcia na wyjściu będzie zależała od prędkości obrotowej prądnicy) i regulatora napięcia (przekształtnika energoelektronicznego). Przy większych mocach prądnic SMPM najbardziej efektywne są prostowniki sterowane. Stosowanie generatorów synchronicznych SG nie jest uzasadnione w przypadku PME.

W przypadku agregatów kogeneracyjnych zintegrowanych z mikrobiogazownikami najczęściej stosuje się prądnice indukcyjne (asynchroniczne). Aby mogły one pracować w sieci wydzielonej wymagają zastosowania regulatora mocy biernej, rozwiązanie to jest dość skomplikowane jak na potrzeby nowoczesnej PME, sprawność tego rozwiązania jest niska. Prądnice indukcyjne nie wymagają regulatora napięcia w przypadku podłączenia bezpośrednio do sieci elektroenergetycznej (jest to jedno z najtańszych i najmniej skomplikowanych rozwiązań), wówczas jedynie konieczna jest regulacja prędkości obrotowej napędowego silnika gazowego. Aby w pełni wykorzystać możliwości prądnicy indukcyjnej oraz zintegrować źródło z instalacją PME należy zastosować przekształtnik sterowany dostosowujący parametry generowanego napięcia do potrzeb PME.

Bateria akumulatorów w PME występuje jako odbiornik oraz zasobnik i źródło energii elektrycznej. Funkcja odbiornika dotyczy baterii akumulatorów samochodu elektrycznego (EV), który jest istotnym ogniwem PME. Proponowana koncepcja instalacji PME przewiduje stosowanie podwójnego zasobnika akumulatorowego - bateria stacjonarna oraz bateria w samochodzie elektrycznym (mogą to być baterie tego samego typu, które w zależności od aktualnego stopnia naładowania można zainstalować w samochodzie EV). Akumulatory EV, oprócz głównej funkcji zasobnika energii elektrycznej dla celów transportowych, mogą być źródłem energii dla PME (zasilanie awaryjne, gromadzenie nadwyżki produkcji energii elektrycznej, wyrównywanie obciążeń). Bateria stacjonarna nie jest niezbędna, lecz pełni ważną rolę zasobnika – aktywnego członu systemu DSM/DSR (obniżanie szczytów i wypełnianie dolin obciążenia: na poziomie OSP, a w przyszłości na poziomie OSD i PME), powiązanego z całym procesem kształtowania się cen energii elektrycznej i usług systemowych.

W propozycji warstwy zasilającej w PME wyróżniono trzy rodzaje lokalnej sieci elektrycznej różniące się napięciami (rys. 1), są to sieci 3x400 V AC, 110 V DC i 24 V DC.

Rozwiązanie to wydawać się może nowatorskie, jest z pewnością nowym spojrzeniem na możliwości zasilania urządzeń elektrycznych w budynku i jak się okazuje pozwala na wprowadzenie nowych funkcjonalności sterowania odbiornikami. Instalacja taka stwarza pozorne nadmierne skomplikowanie. Jednak należy podjąć już dyskusję, gdzie w gospodarstwie domowym stosowane musi być zasilanie prądem przemiennym: trójfazowym bądź jednofazowym. Otóż, są to urządzenia dużej mocy (jak na potrzeby gospodarstwa domowego, powyżej 1 kW), takie jak pralka, płyta kuchenna, piekarnik, instalacja centralnego ogrzewania czy ciepłej wody użytkowej (zasobnik wody bądź ogrzewacz przepływowy).

Jednak z wymienionych urządzeń również systemy ogrzewania nie muszą być zasilane napięciem przemiennym. Stosowanie grzałek nie wymaga napięcia AC; jakość energii elektrycznej (wartość napięcia, tętnienia) dostarczanej do grzałek też nie musi spełniać wysokich wymagań. Stosowane elektryczne pompy w systemach ogrzewania mają moc do 100 W i z powodzeniem mogą być zasilane napięciem 24 V (takie rozwiązania już istnieją, choćby pompy stosowane w motoryzacji w układach dogrzewania, są przystosowane do podwyższonych temperatur). Wniosek jest następujący: „gniazdka elektryczne” zasilane z sieci prądu przemiennego będzie występowało tylko w kilku punktach budynku, będzie to z pewnością kuchnia oraz kotłownia.

Prawie wszystkie współczesne urządzenia RTV, AGD, oświetlenie czy też sprzęt komputerowy zasilane są poprzez wbudowane przetwornice. Skoro konieczne jest obniżanie napięcia zasilania do poziomu odpowiedniego dla tych urządzeń to z powodzeniem można zunifikować napięcie zasilania tych urządzeń i wprowadzić jedną wartość (i tak każde urządzenie małej mocy posiada wbudowaną przetwornicę, a sprawność przetwarzania energii elektrycznej przy mniejszych różnicach napięcia jest wyższa). Przeglądając dostępne urządzenia małej mocy można zauważyć, że napięcie zasilania większości z nich jest niższe niż 24 V (komputery, telewizory, drobne AGD, itp.). Również oświetlenie (przy rosnącej tendencji stosowania energooszczędnych rozwiązań LED) nie wymaga już zasilania prądem przemiennym (zwykle żarówki też oczywiście tego nie wymagały, energooszczędne świetlówki kompaktowe mają wbudowane przetwornice). Dodatkowo, zastosowanie urządzeń na prąd stały oraz przekształtnika w miejscu przyłączenia sieci zewnętrznej ogranicza lub nawet całkiem eliminuje problem generacji mocy biernej.

Poziom napięcia 110 V DC został wybrany ze względu na poziom napięcia zasobnika akumulatorowego samochodu elektrycznego (napięcie dobranego zasobnika samochodu elektrycznego wynosi 72 V, przy tym prostsza konstrukcja przekształtnika jeśli napięcie podczas ładowania zasobnika będzie niższe niż sieci zasilającej). Oczywiście wartość tego napięcia może być inna, dostosowana do wymagań indywidualnych, ale najkorzystniej jest w przypadku kiedy napięcie maksymalne zasobnika podczas ładowania będzie niższe od napięcia w sieci zasilającej. Sieć 110 V została wprowadzona jako alternatywa dla sieci prądu przemiennego dla urządzeń większej mocy, np. może być wykorzystana do celów grzewczych. Oczywiście proponowany interfejs sieciowy posiadający budowę modułową i umożliwia pominięcie szyny 110 V.

Proponowane rozwiązanie jest dość dużym wyzwaniem dla architektów, ponieważ na etapie projektowania budynku warto wprowadzić uniwersalność w późniejszych ewentualnych zmianach modernizacyjnych. Czyli budynek powinien mieć możliwość względnie łatwego modyfikowania instalacji elektrycznej (np. prowadzenie wszelkich przewodów w sufitach podwieszanych, lub w podłodze z dostępem od piwnicy).

Warstwa sterowania

Zaletą zastosowania zasilania prądem stałym jest prostsza konstrukcja przetwornic/zasilaczy. Oczywiście można dyskutować, czy potrójna instalacja podniesie koszty budowy. Ale wraz z

warstwą automatyki budynkowej jest to rozwiązanie jak najbardziej akceptowalne. Automatyka budynkowa (np. sieć KNX) umożliwia zdalne sterowanie odbiornikami, bez potrzeby prowadzenia instalacji do włączników (np. zastosowanie zdalnego sterowania oświetleniem, transmisja cyfrowa np. Bluetooth, ZigBee, lub też analogowa). Co więcej, pojawiły się już rozwiązania włączników nie wymagających zasilania (NXP, np. posiadają wbudowany zasobnik energii elektrycznej o pojemności wystarczającej na przesłanie sygnału bezprzewodowego do urządzenia, a źródłem energii może być miniaturowe ogniwo fotowoltaiczne lub element piezoelektryczny).

Inteligentny budynek jest to budynek zaprojektowany zgodnie ze współczesnymi standardami i przy wykorzystaniu nowoczesnych technologii. Jego najważniejsze cechy to:

- komfort,
- bezpieczeństwo,
- ekologia.

Dzięki tej integracji zyskujemy funkcjonalności, które sprawiają, że podnosi się komfort użytkownika budynku jednocześnie spełniając warunki budynków energooszczędnych i PME. Dodatkowo automatyka znacznie zwiększa bezpieczeństwo mieszkańców oraz zmniejsza koszty eksploatacji budynku (np. automatyka pamięta za nas o wyłączeniu urządzeń niepotrzebnych w danej chwili). Podstawowym składnikiem warstwy sterowania PME jest nowoczesna instalacja automatyki. Jest to nadrzędny system zarządzający wszystkimi pozostałymi instalacjami oraz urządzeniami elektrycznymi znajdującymi się w budynku (rysunek 1). Nadrzędny sterownik jest centralnym punktem sieci teleinformatycznej budynku. Na funkcje sterownika nadrzędnego składają się:

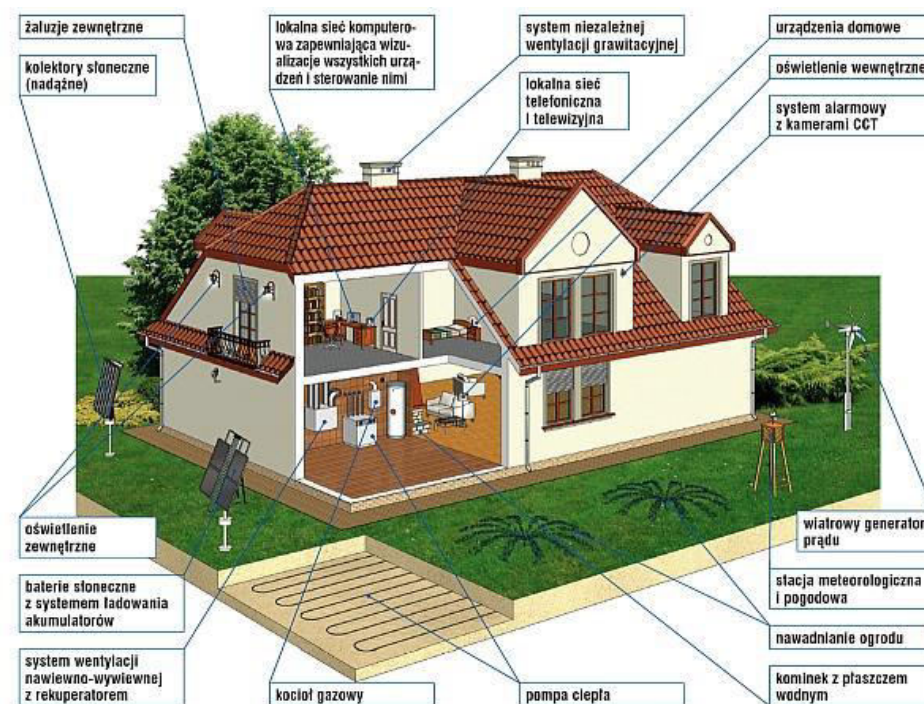
- zarządzanie przepływem i rozdziałem energii pomiędzy źródłami i odbiornikami,
- sterowanie interfejsem sieciowym,
- komunikacja z dostawcą energii elektrycznej (smart-grid),
- komunikacja z licznikami głównymi i podlicznikami,
- nadrzędne funkcje sterowania popytem oraz regulacji mocy biernej,
- przejęcie funkcji liczników głównych integrujące pomiar zużycia wszystkich mediów oraz produkcji energii,
- komunikacja ze sterownikiem obiektowym automatyki budynkowej.

Kluczową cechą inteligentnego domu (rezydencji) jest w dotychczasowej praktyce komfort. Tymczasem w masowych zastosowaniach ważniejsza jest możliwość odczuwalnego zmniejszenia kosztów jego utrzymania. Automatyka łączy ze sobą urządzenia i pozwala na wprowadzenie algorytmów zwiększających efektywność w zużyciu energii. Efektywność ta przekłada się na mniejsze zużycie energii, a tym samym mniejsze wydatki i mniejszą szkodliwość dla środowiska. Największe oszczędności można uzyskać na zarządzaniu ogrzewaniem. Temperaturę możemy obniżać w nocy oraz w czasie naszej nieobecności (każdy 1°C mniej to 5% do 10% mniejsze zużycie energii). Grzejniki z kolei mogą być całkowicie wyłączone w czasie otwarcia okna. Jest to dobry przykład jak integracja systemu alarmowego z ogrzewaniem może zaowocować uniknięciem dużych strat ciepła. Drugim obszarem uzyskania oszczędności jest energia elektryczna (odłączanie od zasilania urządzeń niewymagających zasilania w danej chwili). Automatyka budynkowa udostępnia liczne sposoby uniknięcia takiego marnowania energii, ale co trzeba podkreślić, bez odczuwania przez nas jakiegokolwiek dyskomfortu z tego powodu.

Oprócz sterownika nadrzędnego instalacja PME jest wyposażona w sterownik obiektowy automatyki budynkowej. Sterownik ten przejmuje kontrolę (w ramach realizowanego algorytmu) nad odbiornikami zainstalowanymi w PME i obsługą czujników. Sterowanie odbiornikami może odbywać się na kilka sposobów:

- sterowanie indywidualne – każde urządzenie posiada swój indywidualny wyłącznik,

- sterowanie centralne – urządzenie sterowane magistralą informatyczną (KNX, Ethernet, CAN, RS-485, itp., czyli urządzenie musi posiadać odpowiedni kontroler),
- sterowanie grupowe urządzeniami – odłączanie grup urządzeń, pomieszczeń,
- sterowanie hybrydowe – w obwodzie sterowania muszą istnieć co najmniej dwa podane wyżej typy sterowania (np. oświetlenie sterowane grupowym wyłącznikiem oraz indywidualnie poprzez wbudowane w obudowę lub źródło światła kontrolery).



Rys. 4. Elementy PME.

Wyłączniki stosowane w nowoczesnej instalacji PME umożliwiają sterowanie z linii transmisyjnych kontrolera (sygnały sterujące indywidualnie lub też wyłączniki obsługujące magistralę danych na podstawie sygnałów z sensorów) oraz sterowanie ręczne (czujniki/włączniki instalowane na ścianach). Instalacja automatyki budynkowej PME jest wyposażona w różnego rodzaju sensory (np. ruchu, temperatury, itp.) oraz stację pogodową. Urządzenia sterowane centralnie przesyłają informację zwrotną do sterownika, łącznie z parametrami chwilowymi. Urządzenia sterowane indywidualnie lub grupowo powinny posiadać możliwość przesłania informacji zwrotnej do sterownika ze stanem pracy.

Warstwa licznikowo-pomiarowa

Istotą warstwy licznikowo-pomiarowej jest możliwość zintegrowania wszystkich informacji o zużyciu jak i produkcji energii w jednym liczniku elektronicznym – inteligentnym (rysunek 2). Warstwa licznikowo-pomiarowa to zestaw rozproszonych punktów pomiarowych w głównych gałęziach instalacji PME. Aby nie stosować dodatkowego urządzenia główny licznik można zintegrować ze sterownikiem nadrzędnym.

Pomiary energii produkowanej przez OZE oraz przepływającej przez zasobniki akumulatorowe są realizowane przez przekształtnik. Również pomiar zużycia energii w poszczególnych szynach zasilających także może być realizowany przez funkcjonalność przekształtnika (rozproszone układy licznikowe muszą posiadać możliwość synchronizowania się z licznikiem głównym oraz buforować dane na wypadek awarii). Rozproszenie urządzeń licznikowo-pomiarowych pozwala na grafikowanie bilansów PME w procesie eksploatacji, z

uwzględnieniem prognozowania produkcji i zużycia energii oraz wymiany z zasobnikami (energii elektrycznej, ciepła) oraz z siecią elektroenergetyczną.

Oczywiście dostawca medium energii może zażądać instalacji własnego licznika. Wówczas powinien mieć dostępną funkcjonalność licznika inteligentnego z dwukierunkową transmisją danych (licznik włączony w sieć smart-grid) lub też możliwość transmisji danych do licznika głównego.

Przekształtnik inteligentny (interfejs sieciowy)

Proponowane rozwiązanie przekształtnika przeznaczonego do PME jest rozwiązaniem rozproszonym, modułarnym, wielowejściowym i wielowyjściowym, przy czym wybrane punkty przyłączenia mogą, zależnie od warunków, pełnić funkcję zarówno wejść jak i wyjść. Przekształtnik pozwala na:

- inteligentne dostosowywanie się do bieżących warunków energetycznych w obrębie PME i KSE (w sieci elektroenergetycznej),
- racjonalne rozdzielanie/magazynowanie energii oraz
- umożliwia wykorzystanie energii zgromadzonej w zasobnikach (w razie potrzeby ze strony sieci dystrybucyjnej) do stabilizacji/poprawy pracy KSE.

Przekształtnik inteligentny charakteryzuje się występowaniem dwóch warstw. Są to:

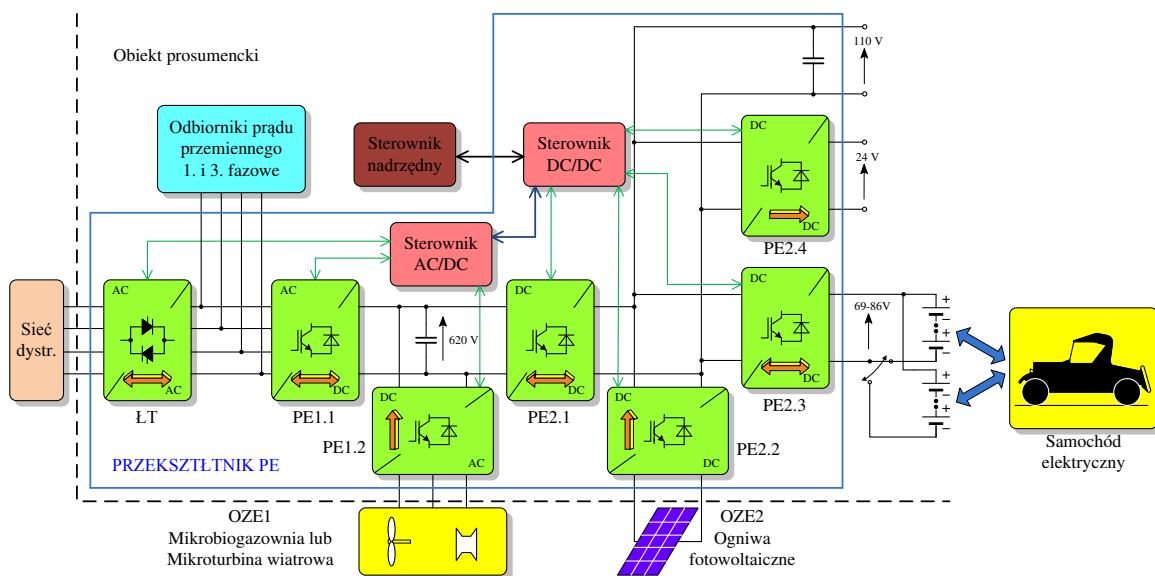
- warstwa sprzętowa (elektryczna), w której integrowane są różne fragmenty PME o różnych napięciach (odbiorniki, źródła OZE, zasobniki energii elektrycznej, przyłącze sieci rozdzielczej,
- warstwa logiczna, która bazuje na układzie sterowania złożonym z dwóch sterowników. Pierwszy sterownik DC-DC (rys. 4) jest sterownikiem nadrzędnym całego przekształtnika PE. Drugi sterownik AC-DC jest sterownikiem tej części przekształtnika PE, która przyłączona jest do sieci dystrybucyjnej i mikroturbiny wiatrowej lub/i mikrobiogazowni. Oba sterowniki spełniają lokalnie funkcje realizacji stabilizacji wybranych wielkości (napięcie, mocy OZE) oraz kontroli kierunku przepływu energii w obrębie PME. Sterownik nadrzędny obiektu prosumenckiego (niezależne od przekształtnika sterownika obiektowego przedstawionego na rys. 1) w tym przypadku odpowiada za kontrolę pracy całej mikroinstalacji, określając tryby pracy i wartości zadane dla sterowników przekształtnika PE oraz odpowiada za komunikację i integrację przekształtnika z pozostałymi urządzeniami podłączonymi do PME.

Przy tworzeniu koncepcji przekształtnika przyjęto następujące założenia:

- przyłączenie do sieci rozdzielczej następuje przez sieć czteroprzewodową 400 V,
- w przekształtniku występują dwa poziomy napięć stałych 620 V i 110 V (odpowiadające różnym charakterystykom odbiorników i źródeł OZE,
- możliwe jest zasilanie odbiorników napięcia przemiennego (jedno i trójfazowych) jednak docelowo ich liczba powinna ulegać redukcji na rzecz odbiorników zasilanych napięciem stałym,
- zakłada się dwa poziomy napięć stałych do zasilania odbiorników (110 V i 24 V), przy czym możliwe jest, dzięki modułowej budowie, uzyskanie w przekształtniku innych poziomów napięć w zależności od potrzeb użytkownika,
- jako zasobniki akumulatorowe wykorzystuje się moduły o napięciu znamionowym 72 V (6 baterii akumulatorowych 12 V). Zakłada się wykorzystanie dwóch pełnych modułów 72 V, przy czym w danej chwili jeden jest przygotowany do wykorzystania w samochodzie elektrycznym,

- zakłada się wykorzystanie dwóch źródeł energii: mikrobiogazowni lub mikroturbiny wiatrowej, współpracującej z generatorem o napięciu 400 V (AC) oraz ogniw PV o napięciu do 72 V (DC).

Proponowane rozwiązanie przekształtnika inteligentnego przedstawiono na rys. 5. Przekształtnik zawiera w swej strukturze dwa przekształtniki podstawowe (przekształtnik AC/DC i przekształtnik DC/DC) o różnych funkcjach. Każdy z przekształtników podstawowych składa się natomiast z kilku przekształtników składowych o różnych funkcjach, topologiach i właściwościach, które można ze sobą powiązać za pomocą układu sterowania (sterownika AC/DC i sterownika DC/DC). Każdy z układów sterowania jest systemem mikroprocesorowym z mikrokontrolerem sygnałowym, który wykorzystując swoje zasoby (w szczególności możliwości obliczeniowe i odpowiednie układy peryferyjne) umożliwi sterowanie kilkoma przekształtnikami składowymi. Na symbolach przekształtników składowych (rys. 5) oznaczono kierunki przesyłu energii, który może być jedno i dwukierunkowy. Rolę sterownika nadrzędnego całego przekształtnika PE pełni sterownik DC/DC, który poprzez komunikację lokalną zadaje wielkości dla sterownika AC/DC. Dodatkowo komunikuje się on ze sterownikiem obiektowym PME, który w oparciu o monitorowanie sygnałów w różnych punktach obiektu określa tryb pracy i wielkości zadane dla przekształtnika. W dalszej części omówiona jest funkcjonalność każdego z przekształtników podstawowych i składowych, oraz proponowane topologie i realizowane zadania.



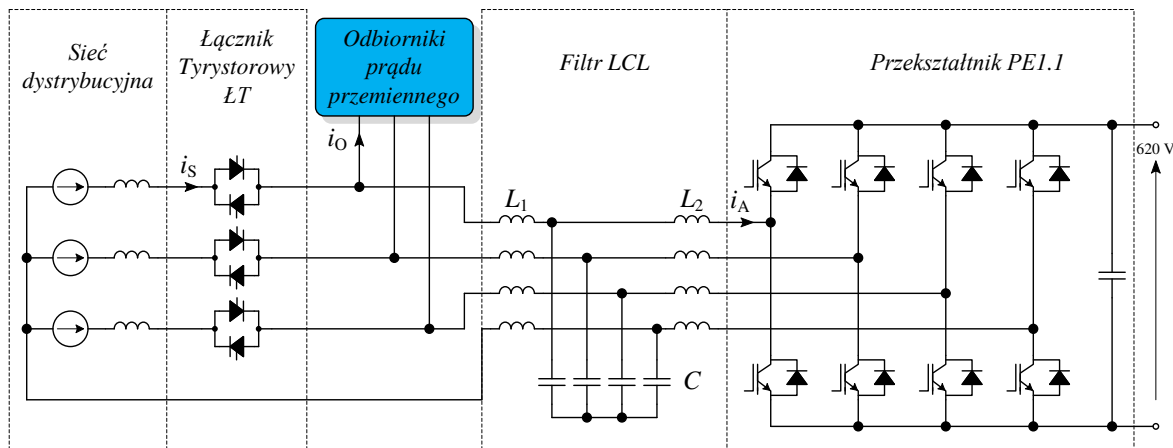
Rys. 5. Koncepcja inteligentnego przekształtnika PE dla obiektu prosumenckiego.

Przekształtnik wejściowy PE1

Przekształtnik PE1 zawiera w swej strukturze dwa przekształtniki, z których pierwszy PE1.1 umożliwia wymianę energii między siecią zasilającą a obwodami DC, a drugi PE1.2 odpowiada za współpracę z generatorem (mikrobiogazownia lub mikroturbina wiatrowa) z założonym śledzeniem punktu maksymalnej mocy. Dodatkowo przekształtnik wyposażony jest w sterowany sygnałem typu załącz/wyłącz układ łącznika tyrystorowego, który służy do odłączania od sieci zasilającej w przypadku przerw w zasilaniu, charakteryzujących się niską impedancją po stronie sieci dystrybucyjnej. Funkcjonalność i działanie przekształtnika zostanie przedstawiona przy omawianiu przekształtników składowych PE1.1, PE1.2.

Przekształtnik składowy PE1.1.

Przekształtnik składowy PE1.1 jest dwukierunkowym falownikiem trójfazowym czterogałęziowym, który przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Przekształtnik PE1.1 i sposób jego przyłączenia do sieci dystrybucyjnej

Przekształtnik PE1.1 przyłączony jest do sieci dystrybucyjnej przez:

- wejściowy filtr pasywny LCL typu T, pozwalający na skuteczną filtrację wyższych harmoniczných prądów i napięć wynikających z przełączeń tranzystorów,
- łącznik tyrystorowy ŁT (o sterowaniu dwustanowym) spełniający funkcję elementu odłączającego od sieci dystrybucyjnej w przypadku awarii i przejście do pracy wyspowej.

Przekształtnik PE1.1 umożliwia pracę w dwóch podstawowych trybach:

1. Tryb współpracy z siecią dystrybucyjną z poborem/oddawaniem energii.
2. Tryb pracy wyspowej.

W pierwszym przypadku, przy współpracy z siecią dystrybucyjną z poborem/oddawaniem energii, możliwe jest uzyskanie następujących funkcji przekształtnika:

- doładowywanie/rozładowywanie zasobników energii,
- zasilanie odbiorników z sieci dystrybucyjnej, ze źródeł OZE lub zasobników energii,
- ograniczanie poboru mocy z sieci na określonym poziomie lub realizacja dostarczania do sieci dystrybucyjnej określonej mocy (wynikających z zapotrzebowania w sieci lub aktualnej taryfy),
- kompensacja mocy biernej w punkcie przyłączenia,
- ograniczanie harmoniczných w prądach sieciowych i symetryzacja prądów odbiorników niesymetrycznych (w punkcie przyłączenia).

W drugim przypadku, przy pracy wyspowej, przekształtnik ma za zadanie zapewnienie odpowiedniego kształtu napięcia odbiorników prądu przemiennego, dostarczenie im wymaganej mocy oraz odpowiednie wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych OZE i zasobników energii.

Rola przekształtnika PE1.1 jest znacząca przy istniejących, typowych odbiornikach prądu przemiennego. W przypadku większego udziału odbiorników napięcia stałego w PME rola przekształtnika PE1.1 będzie stawać się coraz mniej znacząca, co może skutkować tym, że z układu będzie mógł być usunięty łącznik tyrystorowy ŁT, a przekształtnik PE1.1 może stać się klasycznym falownikiem trójgałęziowym realizującym funkcje związane jedynie z podłączeniem do sieci dystrybucyjnej.

Przekształtnik składowy PE1.2.

Przekształtnik PE1.2 służy do współpracy z mikroturbiną wiatrową lub mikrobiogazownią ma klasyczną topologią trójfazowego falownika napięcia.

Mikroturbina wiatrowa oraz mikrobiogazownia współpracuje z maszyną asynchroniczną lub synchroniczną (z magnesami trwałymi), a przekształtnik umożliwia lepsze wykorzystanie energii przy zmiennych warunkach pracy źródeł OZE. Przekształtnik PE1.2 jest dwukierunkowy, jednak w niniejszym zastosowaniu przesył energii odbywa się tylko od źródła do szyny DC o napięciu 620 V. W zależności od zastosowanej maszyny elektrycznej stosuje się różne algorytmy sterowania przekształtnikiem PE1.2. Z punktu widzenia funkcjonalności przekształtnik PE1.2 powinien realizować funkcję śledzenia punktu maksymalnej mocy (MPPT) źródła z możliwością jej ograniczania, gdy nie można gromadzić energii w zasobnikach lub przy braku zapotrzebowania na energię w odbiornikach bądź w sieci dystrybucyjnej.

Sterowanie przekształtnikiem PE1

Sterownik AC/DC, kontrolujący pracę wszystkich komponentów w przekształtniku PE1, pełni rolę układu podrzędnego w stosunku do sterownika DC/DC i sterownika obiektowego obiektu prosumenckiego, którego rolą jest zadawanie trybów pracy i określanie mocy zapotrzebowanej w założonych punktach domu.

Na podstawie wartości zadanych, sterownik przekształtnika AC/DC będzie realizował następujące zadania:

- dla trybu współpracy z siecią: zapewnienie zadanej mocy czynnej w punkcie przyłączenia do sieci dystrybucyjnej, zasilania odbiorników prądu przemiennego (dzielenie tego zadania z siecią dystrybucyjną), generacja zadanej mocy biernej, wymaganych harmonicznym oraz symetryzacja prądu (ograniczanie harmonicznym prądu i zapewnienie wymaganego współczynnika mocy w punkcie przyłączenia do sieci dystrybucyjnej),
- dla trybu pracy wyspowej: zapewnienie odpowiedniego napięcia na zaciskach odbiorników prądu przemiennego i związana z tym generacja mocy czynnej i biernej, harmonicznym i składowym symetrycznym prądu,
- zapewnienie maksymalnego wykorzystania energii ze źródła odnawialnego OZE1 (śledzenie punktu maksymalnej mocy) oraz w przypadku braku zapotrzebowania na energię lub braku możliwości jej dalszego gromadzenia w zasobnikach – ograniczanie mocy z OZE1.

Zakłada się w przypadku sterowania przekształtnikiem PE1, że wykorzystuje się w nim napięcie obwodu pośredniczącego 620 V, przy czym jego stabilizacja będzie realizowana za pomocą przekształtnika PE2.1 (DC/DC). Dzięki temu uzyskuje się jednolitą koncepcję sterowania (o stałej topologii), w której przekształtnik PE1 pełni rolę układu realizującego przekazywanie energii między siecią dystrybucyjną, odbiornikami prądu przemiennego, źródłem energii odnawialnej OZE1 i obwodami napięcia stałego.

Lokalny układ sterowania przekształtnikiem AC/DC będzie korzystał jedynie z wielkości niezbędnych do prawidłowego sterowania obwodami głównymi przekształtnika. Sumaryczna liczba tranzystorów w przekształtniku PE1 (14) pozwala na wykorzystanie tylko jednego sterownika opartego o mikrokontroler sygnałowy.

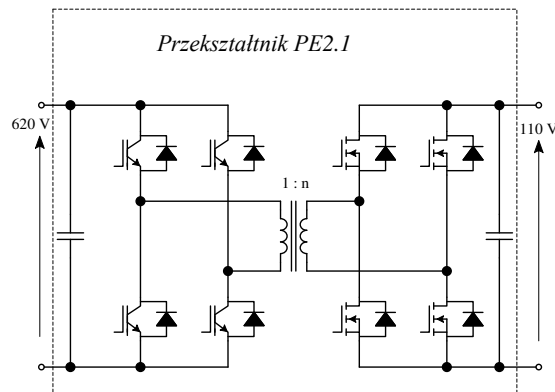
Przekształtnik prądu stałego PE2

Przekształtnik PE2 zawiera w swej strukturze cztery przekształtniki składowe, przedstawione na rys. 5. Pierwszy z nich PE2.1 służy jako bufor pośredniczący między obwodami napięcia 620 V i 110 V, drugi PE2.2 odpowiada za współpracę z ogniwami fotowoltaicznymi, trzeci PE2.3 za współpracę z akumulatorowymi zasobnikami, a czwarty PE2.4 za wytwarzanie napięcia 24 V. Napięcie 110 V, traktowane jako główne napięcie wyjściowe zostało tak dobrane, żeby ograniczyć średnicę przewodów potrzebnych do zasilania odbiorników

większej mocy z napięcia stałego, ograniczyć niebezpieczeństwo związane z porażeniem prądem elektrycznym oraz zmniejszyć koszty budowy przekształtnika. Funkcjonalność i działanie przekształtnika zostanie przedstawiona przy omawianiu przekształtników składowych.

Buforowy przekształtnik PE2.1

Topologię dwukierunkowego przekształtnika DC-DC służącego do łączenia obwodów napięcia stałego 620 V i obwodu napięcia stałego 110 V przedstawiono na rysunku 7. Jest to przekształtnik typu DAB (Dual Active Converter) z separacją galwaniczną w postaci transformatora średniej częstotliwości.



Rys. 7. Przekształtnik PE2.1 łączący dwa obwody napięcia stałego.

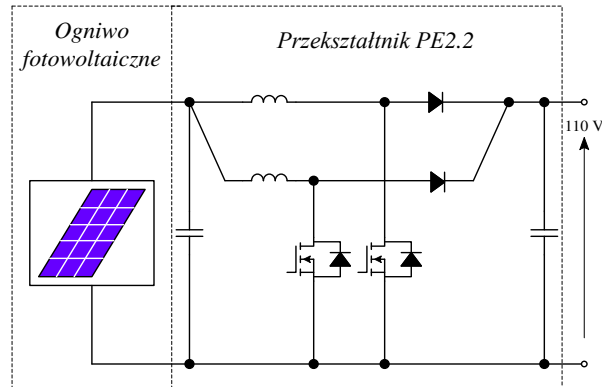
Po stronie napięcia 620 V stosuje się tranzystory IGBT, które wymuszają stosowanie częstotliwości przełączania na poziomie 20 - 40 kHz. Przy takich częstotliwościach transformator ma znacznie mniejsze gabaryty niż niskoczęstotliwościowy transformator o tej samej mocy. Po stronie niskiego napięcia stosuje się tranzystory MOSFET, ponieważ przy takim napięciu cechują się one mniejszymi stratami mocy niż tranzystory IGBT.

Podstawową rolą przekształtnika PE2.1 jest bilansowanie przepływu energii między dwoma podstawowymi poziomami napięcia stałego. Z tego względu zastosowano przekształtnik dwukierunkowy charakteryzujący się dla jednego kierunku możliwościami podwyższania, a dla drugiego obniżania napięcia. Praca i kierunek przekazywania energii przekształtnika jest ściśle powiązana z pracą przekształtnika PE1 (aktualnym zapotrzebowaniem na moc po stronie napięcia przemiennego i stałego). Interesującym z punktu widzenia funkcjonalności jest to, że możliwe jest, niezależnie od stanu pracy, realizowanie przez przekształtnik PE2.1 zadania stabilizacji napięcia 620 V. Za stabilizację napięcia 110 V odpowiedzialny jest natomiast przekształtnik PE2.3, współpracujący z zasobnikami energii. Realizacja funkcji stabilizacji napięcia 620 V w przekształtniku PE2.1 skutkuje autonomicznym bilansowaniem przepływu energii pomiędzy obwodami DC bez udziału sterownika nadrzędnego. W przekształtniku wprowadza się ograniczenia na wartość maksymalną moc/prądu co powoduje ochronę tego przekształtnika przed przeciążeniem.

Przekształtnik do współpracy z ogniwami fotowoltaicznymi PE2.2

Do współpracy z ogniwami fotowoltaicznymi można zastosować około kilkunastu rozwiązań przekształtnika tranzystorowego DC-DC (np. rozwiązań z transformatorem wysokiej częstotliwości zapewniającym izolację galwaniczną pomiędzy ogniwem fotowoltaicznym, a obwodem DC). Ze względu na niewielką różnicę między napięciem ogniw fotowoltaicznych oraz napięciem obwodu DC 110 V, w ramach opracowywanej koncepcji zdecydowano się na zastosowanie przekształtnika beztransformatorowego podwyższającego napięcie. Topologię

stosunkowo prostego przekształtnika współpracującego z ogniwem fotowoltaicznym przedstawiono na rys. 8. Jest to przekształtnik podwyższający napięcie (typu BOOST) w wersji dwustopniowej. Wybór wynikał z potrzeby ograniczenia kosztów przekształtnika jako całości i ograniczenia liczby sterowanych przez sterownik DC/DC zaworów energoelektronicznych.



Rys. 8. Przekształtnik PE2.2 współpracujący z ogniwami fotowoltaicznymi.

Zastosowanie dwustopniowego przekształtnika typu BOOST, z tranzystorami sterowanymi z odpowiednim przesunięciem fazowym, pozwala na zmniejszenie impulsów prądowych związanych z przekazywaniem energii do obwodu napięcia stałego 110 V (w stosunku do rozwiązania jednostopniowego). Pozwala to również uzyskać wyższą sprawność przekształtnika (typowo pojedyncze przekształtniki typu BOOST stosuje się do mocy kilkuset watów). Ograniczenie stopni przekształtnika do dwóch wynikało z faktu, że większa liczba stopni wymaga większej liczby sygnałów sterujących. Zastosowany przekształtnik jest jednokierunkowy.

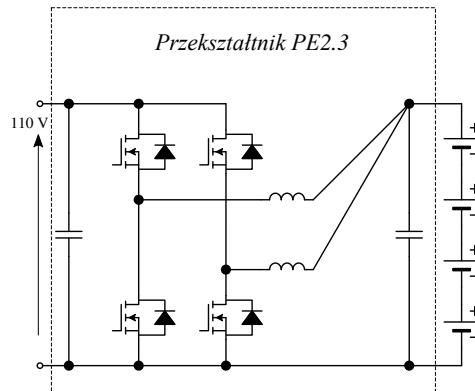
Funkcjonalnie działanie przekształtnika PE2.2 jest podobne do działania przekształtnika PE1.2, tj. realizacja jednokierunkowego przepływu energii ze śledzeniem punktu maksymalnej mocy ogniwa fotowoltaicznego, przy możliwości jej ograniczenia.

Przekształtnik do współpracy z zasobnikiem akumulatorowym PE2.3

Przekształtnik PE2.3 służy jako układ ładowania/rozładowania zasobnika w postaci baterii akumulatorów z czego wynika potrzeba stosowania przekształtnika dwukierunkowego. W opracowanej koncepcji rozważa się stosowanie dwóch baterii (stacjonarnej i montowanej w samochodzie elektrycznym) z możliwością podmiany. Ze względu na znamionową wartość napięcia baterii akumulatorów równą 72 V należy w przekształtniku PE2.3 zapewnić regulację napięcia w zakresie napięć od 69 V do 86 V. Ze względu na potrzebę gromadzenia dużych porcji energii możliwe jest wykorzystanie obu zasobników w bilansowaniu zapotrzebowania na moc obiektu prosumenckiego. Z punktu widzenia funkcjonalności przekształtnik PE2.3 realizuje zadanie ładowania/rozładowania zasobników energii pośrednio, a jego nadrzędną rolę jest utrzymywanie stałej wartości podstawowego napięcia stałego 110 V. Aby zapewnić odpowiednie napięcie niezbędna jest dodatkowo regulacja (kontrola) prądu ładowania/rozładowania zasobnika (uwzględnianego w całym bilansie energetycznym domu plus-energetycznego). Istnieje również, jako opcja, możliwość takiego sterowania bilansem mocy w sterowniku DC/DC, aby zapewnić szybki proces ładowania akumulatora do samochodu elektrycznego.

Stosunkowo prostym i tanim rozwiązaniem przekształtnika PE2.3 do współpracy z zasobnikiem akumulatorowym jest przekształtnik o topologii synchronicznego przekształtnika obniżającego napięcie typu BUCK – rys. 9. W tej topologii nie jest możliwe

uzyskanie separacji galwanicznej oraz wymagana jest różnica między napięciem wejściowym a wyjściowym. W zależności od wartości wypełnienia w przekształtniku możliwe jest dwukierunkowe przekazywanie energii, przy czym w przypadku przekazywania energii do zasobnika napięcie jest obniżane, a przy przekazywaniu energii z zasobnika napięcie jest podwyższane. Podobnie jak w przypadku przekształtnika współpracującego z ogniwem fotowoltaicznym (rys. 8), możliwe jest zastosowanie przekształtnika kilkustopniowego (tu dwustopniowego – rys. 9).



Rys. 9. Przekształtnik PE2.3 - dwustopniowy synchroniczny przekształtnik typu BUCK.

Głównymi funkcjami przekształtnika PE2.3 są: odpowiednie dopasowanie napięciowe między zasobnikiem akumulatorowym i napięciem obwodu pośredniczącego 110 V oraz kontrola prądu ładowania/rozładowania akumulatorów. Z punktu widzenia sterowania zakłada się następujący tryb sterowania przekształtnikiem:

- funkcja nadrzędna - stabilizacja napięcia 110 V,
- funkcja dodatkowa - kontrola prądu ładowania/rozładowania akumulatorów.

O wartości mocy/prądu ładowania/rozładowania akumulatorów decyduje sterownik DC/DC w oparciu o zadane wartości ze sterownika obiektowego obiektu prosumenckiego. Połączenie zadań równoczesnej stabilizacji napięcia i kontroli prądu ładowania/rozładowania akumulatorów upraszcza algorytm sterowania całym przekształtnikiem PE przez zmniejszenie liczby trybów pracy przekształtników składowych.

W sterowniku DC/DC (sterującym przekształtnikiem PE2) uwzględnia się poziom naładowania zasobnika akumulatorowego i w razie potrzeby ogranicza się lub blokuje przepływ energii między zasobnikiem, a obwodem napięcia stałego 110 V. Z punktu widzenia sterownika nadrzędnego proces sterowania przekształtnikiem PE2.3 musi uwzględniać:

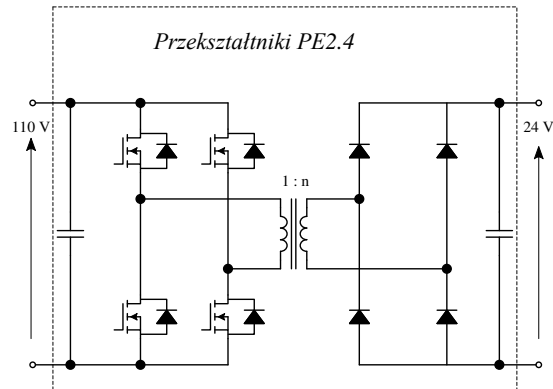
- stan pracy przekształtnika PE1 (współpraca z siecią dystrybucyjną/praca wyspowa),
- aktualne zapotrzebowanie na moc lub nadwyżkę mocy,
- stan naładowania zasobnika akumulatorowego.

Dodatkową funkcją, którą może pełnić sterownik obiektowy (w oparciu o sterowanie przekształtnikiem PE2.3) może być także zarządzanie energią w akumulatorach, aby możliwe było osiągnięcie dodatkowych zysków wynikających z różnic w cenach energii w zależności od pory dnia. Przekształtnik PE2.3 poza wymienionymi funkcjami powinien również zabezpieczać baterię akumulatorów.

Przekształtnik odpływowy PE2.4

W przekształtniku PE2 zakłada się, że można wytworzyć, oprócz podstawowego napięcia 110 V, inne napięcie stałe potrzebne do zasilania odbiorników mniejszej mocy. Ze względu na stosunkowo dużą liczbę potencjalnych odbiorników przyjęto, że przekształtnik PE2.4 zmienia

stałe napięcie 110 V na stałe napięcie 24 V. Stosunkowo prostą topologię przekształtnika PE2.4 przedstawiono na rys. 10. Jest to takie samo rozwiązanie jak w przypadku przekształtnika zasobnikowego PE2.1, jednak z uwagi na jednokierunkowy przesył energii w stopniu wyjściowym przekształtnika transformatorowego można zastosować diody. Z uwagi na pracę tranzystorów na napięciu 110 V i wysoką częstotliwość przełączania, przekształtnik PE2.4 powinien być zbudowany z tranzystorów MOSFET.



Rys. 10. Jednokierunkowy transformatorowy przekształtniki obniżające napięcie PE2.4

Podstawową rolą przekształtnika PE2.4 jest zapewnienie odpowiedniego poziomu napięcia wyjściowego oraz dodatkowo ograniczenie mocy wyjściowej. Z punktu widzenia sterownika nadrzędnego konieczna jest wymiana informacji o mocy pobieranej z odpływu (z wyjścia przekształtnika o napięciu 24 V) oraz umożliwienie odłączenia konkretnego odpływu w przypadku braku możliwości zapewnienia bilansu energetycznego. Zakłada się tu budowę modułową, co oznacza możliwość dostosowywania przez użytkownika poziomu napięć oraz możliwość stosowania obwodów o tym samym napięciu, przy czym do jednego odpływu dołączane są odbiorniki wymagające zachowania ciągłości zasilania, a do drugiego odpływu odbiorniki, które mogą być grupowo odłączone w przypadku deficytu energii. Niniejsze działanie realizowane jest poprzez przedstawiony na rys. 1 sterownik obiektowy.

Sterowanie przekształtnikiem PE2

Sterownik DC/DC komunikuje się ze sterownikiem obiektowym i w oparciu o zadane parametry steruje przekształtnikami DC/DC oraz zadaje wartości dla przekształtnika AC/DC. Mimo, że rolą nadrzędną dla całego przekształtnika pełni sterownik obiektowy (rys. 1), to sterownik DC/DC odpowiada za sterowanie poszczególnymi przekształtnikami i charakteryzuje się pewnym poziomem autonomizacji (np. określaniem kierunku przepływu energii w przekształtniku współpracującym z akumulatorami, czy ograniczaniem mocy ze źródeł odnawialnych w przypadku braku zapotrzebowania na energię). Do głównych zadań układu sterowania przekształtnika DC/DC należy:

- zapewnienie odpowiedniego poziomu napięć obwodów pośredniczących (620 V i 110 V),
- zapewnienie odpowiedniego poziomu napięcia na zaciskach 24 V oraz ochrony przed zwarciami zacisków w obwodach 110 V i 24 V,
- zapewnienie śledzenia punktu mocy maksymalnej w ogniach fotowoltaicznych,
- zapewnienie odpowiedniego napięcia na zaciskach baterii akumulatorów i odpowiedniego ich poziomu naładowania.

Zadaniem sterownika przekształtnika DC/DC jest utrzymywanie stałych wartości napięć obwodów pośredniczących i wyjściowych wraz z odpowiednim bilansowaniem mocy

dostarczanej ze źródeł oraz mocy pobieranej przez odbiorniki i przekazywanej do sieci dystrybucyjnej.

Układ sterowania przekształtnika DC/DC korzysta jedynie z wielkości niezbędnych do prawidłowego sterowania obwodami głównymi przekształtnika. Sumaryczna liczba tranzystorów w przekształtniku PE2 (18) pozwala na wykorzystanie tylko jednego sterownika opartego o mikrokontroler sygnałowy.

Rola sterownika obiektowego i jego wpływ na pracę przekształtnika energoelektronicznego

Sterownik obiektowy (rys. 1) ma za zadanie w sposób kompleksowy zarządzać wszystkimi mikroinstalacjami. Zarządzanie odbywa się poprzez wpływanie (np. poprzez wyjścia dwustanowe) na pracę poszczególnych odbiorników (lub grup odbiorników) oraz poprzez wpływanie na tryb pracy i wartości zadane dla przekształtnika energoelektronicznego. O scenariuszu zarządzania energią będą decydować następujące czynniki:

- cena kWh w systemie dystrybucyjnym,
- zapotrzebowanie odbiorników,
- stopień naładowania zasobnika energii,
- poziomy energii generowane w odnawialnych źródłach energii OZE1 i OZE2,
- potrzeba użytkownika samochodu elektrycznego.

Sterownik obiektowy powinien w sposób kompleksowy zarządzać pracą odbiorników energii (np. wyłączanie odbiorników zbędnych w przypadku nieobecności użytkownika w danym pomieszczeniu), przy uwzględnieniu komfortu użytkownika (np. potrzeba naładowania zasobnika do samochodu elektrycznego powinna mieć wyższy priorytet niż przekazywanie energii do sieci dystrybucyjnej).

Sterownik obiektowy pełni rolę nadrzędną dla sterownika przekształtnika, przy czym pożądane jest dopuszczenie pewnej autonomii działania tego drugiego. Przykładowo sterownik nadrzędny winien zadawać wartości mocy generowanej do systemu dystrybucyjnego, a zapewnienie odpowiedniego rozptywu mocy z poszczególnych źródeł odnawialnych i zasobnika powinno być realizowane przez sterowniki przekształtnika. Wpływ sterownika obiektowego na rozptyw powinien być pośredni (np. poprzez odłączanie odbiorników oraz ograniczanie mocy generowanej do sieci dystrybucyjnej przy zbyt głębokim rozładowywaniu zasobnika). Komunikacja między sterownikiem obiektowym, a sterownikiem DC/DC przekształtnika odbywać się może poprzez jeden z ogólnie stosowanych standardów (np. RS 485 Modbus). Komunikacja ta powinna uwzględniać co najmniej następujące rejestry sterujące (wielkości zadawane) i rejestry służące do monitorowania stanu pracy przekształtnika:

Rejestry sterujące:

- rejestr określający tryb sterowania przekształtnikiem (np. tryb pracy wyspowej czy współpracy z systemem dystrybucyjnym, tryb ładowania/rozładowania zasobnika akumulatorowego, tryb ograniczania mocy w odnawialnych źródłach energii),
- zadane wartości mocy czynnej i biernej w punkcie przyłączenia do systemu dystrybucyjnego,
- zadany prąd ładowania akumulatora (alternatywa do nadrzędnego sterowania mocą w punkcie przyłączenia do sieci dystrybucyjnej powodująca zmianę strategii sterowania w przekształtniku w przypadku potrzeby szybkiego naładowania zasobnika).

Rejestry do monitorowania:

- poziom naładowania zasobnika akumulatorowego,
- wartość napięcia obwodów DC (620 V, 110 V, 24 V),
- moc pobierana ze źródeł odnawialnych,

– moc w punkcie przyłączenia do sieci dystrybucyjnej i moc przekształtnika wejściowego.

W miarę potrzeb rejestry powinny być dostosowane do algorytmów docelowych w sterowniku obiektowym i wynikowych algorytmach sterowników przekształtnika. W pierwszej wersji przekształtnika przeznaczonego do zastosowania w PME zakłada się niezależną realizację funkcji sterujących w przekształtniku i warstwę licznikowo-pomiarową. W ostatecznym rozwiązaniu zakłada się integrację obu funkcji w przekształtniku, co pozwoli na ograniczenie kosztów. Potrzeba pomiarów wielkości elektrycznych na poszczególnych wyjściach przekształtnika ze względu na proces sterowania powoduje, że dodatkowa rozbudowa oprogramowania o funkcje pomiaru energii nie jest skomplikowana. W tym przypadku istnieje potrzeba poszerzenia rejestrów do monitorowania o rejestry z informacją o zużyciu/generacji energii na poszczególnych odpywach przekształtnika.