

## System doboru i optymalizacji parametrów przekształtnika sieciowego AC-DC

**Streszczenie.** Artykuł prezentuje system doboru i optymalizacji parametrów przekształtnika sieciowego AC-DC dedykowanego dla układów rozproszonych. Proponowane rozwiązanie bazuje na metodach dyskretnej optymalizacji wielokryterialnej wykorzystujących algorytmy ewolucyjne i jest narzędziem wspierającym proces projektowania przekształtnika energoelektronicznego. W artykule przedstawiono założenia i działanie systemu, proces projektowania oraz optymalizacji parametrów przekształtnika realizowany przez opracowane środowisko optymalizacyjne.

**Abstract.** This paper presents system for design and optimization of the parameters of grid connected converter dedicated for distributed systems. Introduced solution is based on multi-objective discrete optimization and supports process of the AC-DC converter design. Paper presents foundations and basic system properties, design and optimization process and selected optimization results. (**System for design and optimization of the grid connected AC-DC converter parameters**).

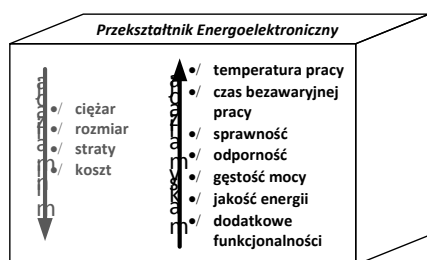
**Słowa kluczowe:** optymalizacja wielokryterialna, metoda projektowania, przekształtnik AC-DC, system rozproszony.

**Keywords:** multi-objective optimization, design procedure, AC-DC converter, distributed system.

### Wstęp

Przekształtnik AC-DC to podstawowy układ energoelektroniczny umożliwiający dwukierunkowe przekształcanie energii, znajdujący zastosowanie w układach napędowych, odnawialnych źródłach energii, układach magazynowania i podwyższających jakość energii, czyli ogólnie tzw. systemach rozproszonych. Przy zwiększającym się udziale źródeł rozproszonych coraz powszechniej stosowane są przekształtniki energoelektroniczne podłączone do sieci elektroenergetycznej [1], [2], [3].

Dobór parametrów projektowych przekształtnika sieciowego AC-DC ma decydujący wpływ na jakość pracy tego układu, realizowane funkcjonalności a także na jego cenę. Aby możliwe było powszechne stosowanie przekształtników energoelektronicznych należy zapewnić wymaganą jakość przekształcania energii elektrycznej i niskie straty a jednocześnie utrzymać możliwie niską cenę układu, czyli pogodzić ze sobą przeciwstawne założenia projektowe, co schematycznie przedstawiono rysunku 1.



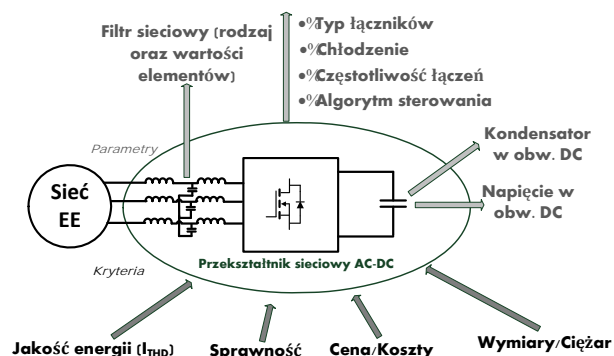
Rys.1. Przeciwnastawne założenia projektowe dla przekształtnika sieciowego AC-DC

Ustalenie wspólnej zależności i znalezienie rozwiązania dla przeciwstawnych wymagań umożliwiają znane z ekonomii metody optymalizacji wielokryterialnej. Optymalizacja parametrów projektowych przekształtnika AC-DC pozwala na redukcję kosztów, podniesienie sprawności i niezawodności układu oraz na rozszerzenie jego funkcjonalności [4], [5].

W przedstawionej pracy celem zastosowania optymalizacji wielokryterialnej jest wsparcie procesu projektowania przekształtnika i znalezienie takich rozwiązań (w tym przypadku parametrów projektowych przekształtnika AC-DC), których jakkolwiek zmiana nie przyniesie już korzyści względem przyjętych założeń (czyli tzw. optimum w sensie Pareto) [6], [7]. Opracowany system doboru i

optymalizacji parametrów umożliwia analizę na etapie założeń i wstępnych obliczeń projektowych jak zmiana jednego lub kilku parametrów projektowych wpłynie na cechy i właściwości układu.

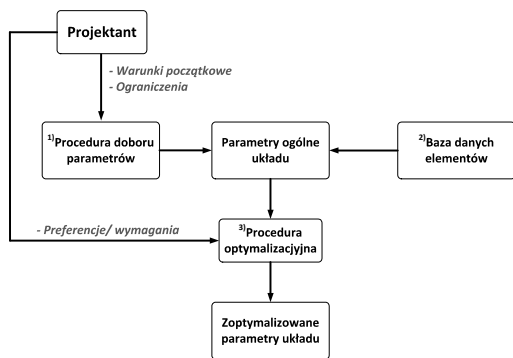
Jako kryteria optymalizacyjne dla przekształtnika sieciowego AC-DC, przedstawione schematycznie na rysunku 2 przyjęto podstawowe cechy układu, takie jak sprawność, objętość, ciężar, jakość przetwarzanej energii oraz koszt. Natomiast optymalizowanymi zmiennymi są parametry projektowe układu (typ filtru po stronie sieci, wartości elementów biernych filtru, rodzaj zastosowanych materiałów, typ i rodzaj łączników mocy, częstotliwość łączeń, poziom napięcia w obwodzie DC oraz pojemność obwodu DC jak i typ zastosowanego kondensatora) [8], [9].



Rys.2. Przyjęte kryteria i parametry optymalizacyjne układu sieciowego przekształtnika AC-DC

Artykuł prezentuje założenia i działanie opracowanej procedury doboru i optymalizacji parametrów projektowych przekształtnika sieciowego AC-DC oraz wybrane wyniki procesu optymalizacji.

Proponowane rozwiązanie dotyczące doboru i optymalizacji parametrów przekształtnika sieciowego AC-DC składa się z trzech podstawowych części: procedury doboru parametrów ogólnych układu (1), bazy danych rzeczywistych, dostępnych na rynku elementów (2) oraz procedury optymalizacji uwzględniającej właściwości rzeczywistych elementów (łączników, dławików oraz kondensatorów) (3). Schematycznie cały proces doboru i optymalizacji parametrów w opracowanym systemie został przedstawiony na rysunku 3.



Rys.3. Schemat ideowy opracowanej procedury doboru i optymalizacji parametrów przekształtnika sieciowego AC-DC

### Procedura doboru parametrów ogólnych układu (1)

Pierwszym krokiem obliczeń jest wyznaczenie ogólnych parametrów projektowych przekształtnika sieciowego AC-DC na podstawie określonych przez projektanta warunków początkowych, jak przedstawiono na rysunku 4.

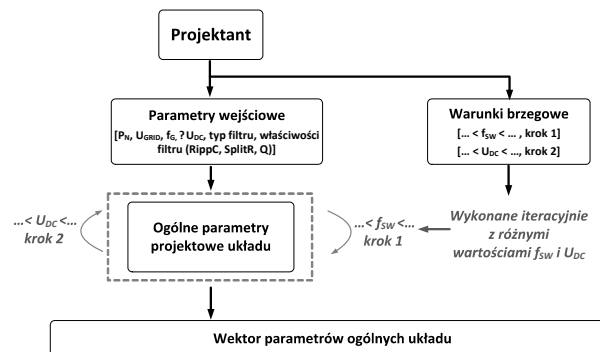
Specyfikacja	Dane ogólne	Warunki brzegowe
$P_N$ 10.0 [KW]	$I_{RMS}$ 14.49 [A]	5.0 [kHz] < $f_s$ < 50.0 [kHz]
$U_{LINE}$ 230.0 [V]	$\omega$ 314.16 [Hz]	600.0 [V] < $U_{DC}$ < 750.0 [V]
$gf$ 50.0 [Hz]	$U_{PEAK}$ 325.27 [V]	0.10 < $R_{th(j-c)}$ < 0.50
$\Delta U_{DC}$ 10.0 [%]	$I_{PEAK}$ 20.50 [A]	$f_{STEP}$ 1.00 [kHz]
	$U_{LL}$ 398.37 [V]	$U_{DCSTEP}$ 5.00 [V]
	$I_{MAX}$ 43.48 [A]	$R_{th(j-c)}$ 0.10
	$U_{LINEMAX}$ 345.00 [Hz]	$L_{tolerance}$ 1000.00 [%]
	$U_{DCMAX} = 1.5 \cdot U_{DC}$	$C_{tolerance}$ 1000.00 [%]
LCL	LCL+Trap	LLCL
<input checked="" type="checkbox"/> Czy obliczać?	<input type="checkbox"/> Czy obliczać?	<input type="checkbox"/> Czy obliczać?
RippC 20.0 [%]		
RippG 7.0 [%]		
$Q_{LCL}$ 2.5 [%]		
$R_{damp}$ 0.0 [%]		
$R_{damp_{DC}}$ 0.0 [%]		

© Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny 2013-2015 (v0.27)

Rys.4. Przedruk ekranu z opracowanego systemu przedstawiający okno deklaracji wartości początkowych oraz warunków brzegowych dla obliczeń projektowych i optymalizacyjnych

Projektant określa moc znamionową układu ( $P_N$ ), znamionowe napięcie sieci ( $U_{GRID}$ ), częstotliwość sieci ( $f_G$ ), dopuszczalne tętnienia w obwodzie DC ( $\Delta U_{DC}$ ), rodzaj analizowanego filtra po stronie sieci ( $LCL$ ,  $LCL+Trap$ ,  $LLCL$ ) oraz jego właściwości tłumiące (maksymalne dopuszczalne tętnienia prądu po stronie przekształtnika wyrażone w procentach wzgl. prądu znamionowego –  $RippC$ , procentowy stosunek wielkości dławika po stronie sieci względem dławika po stronie przekształtnika –  $RippG$  oraz maksymalną moc bierną pobieraną przez filtr –  $Q_{LCL}$ , również wyrażona w procentach wzgl. mocy znamionowej) [9]. Ponadto projektant określa zakres zmian częstotliwości łączeń ( $f_{sw}$ ), krok tych zmian oraz zakres analizowanych poziomów napięć w obwodzie DC ( $U_{DC}$ ) wraz z krokiem zmian. Na podstawie tych wielkości dla konkretnych wartości  $f_{sw}$  i  $U_{DC}$  wyznaczone są parametry ogólne układu, takie jak wartości elementów filtra ( $L_C$ ,  $L_G$ ,  $C_{LCL}$ ), częstotliwość rezonansowa filtra, pojemność w obwodzie DC ( $C_{DC}$ ) oraz szereg pomocniczych parametrów. Procedura wykonuje się iteracyjnie wraz ze zmieniającymi się wartościami  $f_{sw}$  i  $U_{DC}$ , każdy obliczony zestaw

parametrów zapisywany jest jako pojedynczy wektor w macierzy parametrów ogólnych układu. Sposób wyznaczania parametrów został dokładniej przedstawiony w [9] oraz [10], natomiast działanie procedury schematycznie przedstawia rysunek 5.



Rys.5. Procedura doboru parametrów ogólnych układu – schemat ideowy

### Baza danych (2)

Kolejnym elementem przedstawionego systemu jest baza danych rzeczywistych elementów. Aby skrócić czas wykonywania obliczeń optymalizacyjnych oraz przyspieszyć proces projektowania poprzez pominięcie przedstawionego w [4] i [11] studium wykonalności układu w opracowanej procedurze ograniczono się do rzeczywistych, dostępnych na rynku elementów. Baza danych składa się z 3 grup elementów:

- łączników energoelektronicznych – zaimplementowane są w niej tranzystory mocy, zarówno IGBT jak i MOSFET. Każdy tranzystor zaimplementowany jest jako oddzielny rekord w bazie, a dane wykorzystywane do obliczeń wprowadzane są na podstawie noty katalogowej. W pierwszej wersji systemu w obliczeniach pominięto diody zwrotne, skupiając się na tranzystorach jako głównym źródle strat i kosztów;
- dławików – w uproszczonej wersji system wykorzystuje dane gotowych, istniejących dławików. Dane wykorzystywane do obliczeń otrzymywane są na podstawie danych producenta lub pomiarów laboratoryjnych. Każdy dławik w bazie wprowadzony jest jako oddzielny rekord;
- kondensatorów – ostatnim elementem bazy danych są kondensatory, wprowadzane do bazy również na podstawie not katalogowych. Obliczenia dotyczące kondensatorów wykonywane są zarówno dla pojemności obwodu DC jak i pojemności filtra po stronie sieci.

Zaproponowana baza danych pozwala projektantowi na wgląd we właściwości poszczególnych elementów oraz wybór tych które mają być poddane analizie (np. są aktualnie dostępne w magazynie firmy).

Ponadto, poprzez definicję odpowiednich parametrów w bazie danych możliwe jest uwzględnienie w procesie optymalizacji równoległego łączenia elementów układu, takich jak tranzystory mocy czy kondensatory i traktowania ich przez system jako oddzielnych, pojedynczych elementów.

### Procedura optymalizacji (3)

Ostatnim elementem, integrującym wszystkie podzespoły zaproponowanego systemu jest procedura optymalizacji. W celu wykorzystania metod numerycznych system został zaprojektowany tak, aby cały proces projektowania oraz optymalizacji parametrów miał charakter dyskretny. Zarówno zmienne projektowe zapisane w wektorach parametrów ogólnych jak i elementy

zgrupowane w bazie danych są wielkościami dyskretnymi, a w procesie optymalizacji wielokryterialnej wykorzystywane zostały dyskretne algorytmy ewolucyjne [5], [6], [7], [12].

Parametrami optymalizacyjnymi (poddanymi optymalizacji) są wymienione wcześniej zmienne projektowe, czyli: częstotliwość łączeń ( $f_{sw}$ ), poziom napięcia w obwodzie DC ( $U_{DC}$ ), rodzaj filtru po stronie sieci, wartości elementów filtru ( $L_C$ ,  $L_G$ ,  $C_{LCL}$ ), konkretne, rzeczywiste dławiki (dopasowane i wybrane z bazy danych), łącznik mocy (typ, konkretny model oraz ewentualnie ilość elementów połączonych równolegle jako jeden łącznik - na podstawie bazy danych), stała termiczna ( $R_{TH}$ ) radiatora, wartość pojemności w obwodzie DC ( $C_{DC}$ ) oraz typ kondensatora w obwodzie DC (na podstawie bazy danych).

Dla opracowanej procedury i wykonywanych obliczeń zarówno zmienne elektryczne (poziom napięcia, częstotliwość łączeń) jak i cechy fizyczne układ (rodzaj kondensatora, rodzaj dławika, itd.) są traktowane jako zmienne projektowe.

Jako kryteria optymalizacyjne wyrażone przez odpowiadające im wskaźniki jakości [4] przyjęto odpowiednio: objętość (ang. *Volume*,  $V$ ), ciężar (ang. *Weight*,  $W$ ), straty (ang. *Losses*,  $Loss$ ) oraz cenę (ang. *Price*,  $\$$ ). Celem procesu optymalizacji jest minimalizacja przyjętych wskaźników jakości. Dodatkowo znaczenie poszczególnych kryteriów (wyrażone przez odpowiadające im wskaźniki) określana jest przez współczynniki wagowe w globalnej funkcji celu.

Proces doboru i optymalizacji parametrów przekształtnika, został przedstawiony schematycznie na rysunku 6, przebiega on następująco:

a) Projektant określa warunki początkowe: moc znamionową, znamionowe napięcie i częstotliwość sieci oraz dopuszczalny poziom wahań napięcia w obwodzie DC (wyrażony w % względem wartości nominalnej) – okno deklaracji tych parametrów przedstawiono na rysunku 4. System wyznacza szereg wartości pomocniczych (min. prądy i napięcia średnie, maksymalne);

b) Projektant określa warunki brzegowe, tj. analizowany zakres zmian 3 zmiennych projektowych: częstotliwości łączeń, poziomu napięcia w obwodzie DC oraz stałej termicznej radiatora. Ponadto projektant określa krok zmian poszczególnych wartości, co odpowiada gęstości obliczeń, i tak np. może określić zakres zmian napięcia  $U_{DC}$  w przedziale 600-750 V z krokiem 5 V.

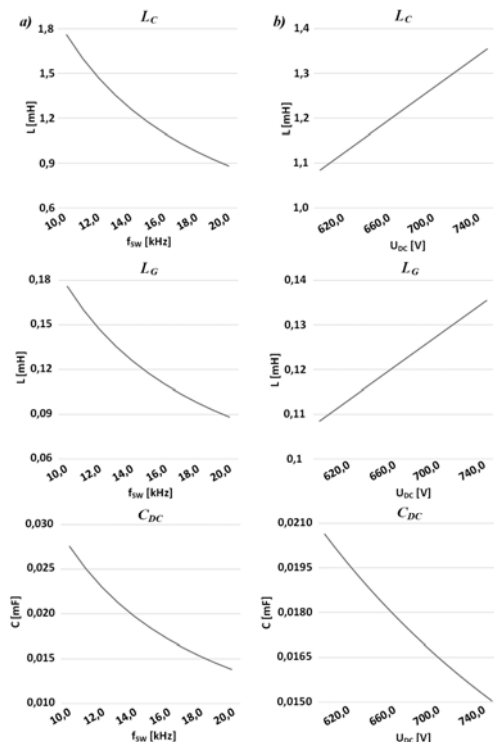
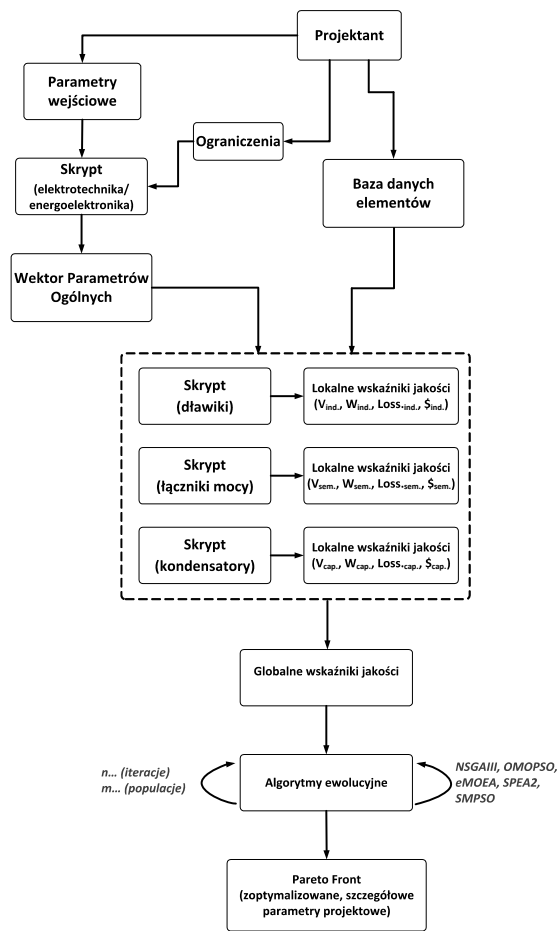
c) Projektant określa jakie rodzaje filtrów po stronie sieci mają być analizowane w trakcie obliczeń ( $LCL$ ,  $LCL+Trap$ ,  $LLCL$ ) [9], możliwa jest jednoczesna analiza wszystkich wymienionych topologii lub tylko wybranych.

d) Ostatnimi precyzowanymi przez projektanta zmiennymi są właściwości tłumiące filtru, wyrażone opisanymi powyżej współczynnikami. Na podstawie określonych wcześniej parametrów system generuje szereg wektorów zawierających parametry ogólnego układu (dla konkretnych wartości  $U_{DC}$  i  $f_{sw}$ ). Możliwa jest graficzna analiza rozkładu poszczególnych parametrów projektowych względem wybranych zmiennych jak przedstawiono na rysunku 7.

e) Kolejnym krokiem obliczeń jest optymalizacja parametrów. Projektant może określić algorytm ewolucyjny (dostępnych jest 5 algorytmów: NSGAIII, OMOPSO, eMOEA, SPEA2 oraz SMPPO [13]) oraz swoje preferencje dotyczące poszczególnych kryteriów poprzez dobór wagi w funkcji celu wg zależności:

$$(1) \quad \min(\alpha_1 \cdot f_1 + \alpha_2 \cdot f_2 + \dots + \alpha_n \cdot f_n),$$

gdzie  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  są współczynnikami wagowymi a,  $f_1, f_2, f_n$  reprezentują kryteria wyrażone przez wskaźniki jakości.



© Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny 2013-2015 (v0.11)

Rys.7. Przykładowy rozkład zmian zmiennych projektowych ( $L_C$ ,  $L_G$  oraz  $C_{DC}$ ) w funkcji zmian częstotliwości łączeń (a) dla 650 V napięcia  $U_{DC}$  oraz w funkcji zmian napięcia  $U_{DC}$  (b) dla 15 kHz częstotliwości łączeń wygenerowany przez opracowany system dla przekształtnika o mocy 10 kW

Ponadto dla zaawansowanego użytkownika możliwe jest określenie wielkości populacji ( $m$ ) oraz maksymalnej liczby ewaluacji funkcji celu ( $n$ ) wykonywanych w trakcie obliczeń algorytmu ewolucyjnego.

Na podstawie parametrów elementów zawartych w bazie danych oraz zaimplementowanych skryptów obliczeniowych dla każdego wektora parametrów ogólnych układu na podstawie algorytmu ewolucyjnego dobierane są poszczególne rzeczywiste elementy z bazy danych i wyznaczane lokalne wskaźniki jakości, jak przedstawiono na rysunku 6. Następnie wyznaczane są przy uwzględnieniu wag poszczególnych kryteriów globalne wskaźniki jakości wg zależności:

$$PI_{Volume} = (\alpha_{ind.} \cdot V_{ind.} + \alpha_{sem.} \cdot V_{sem.} + \alpha_{cap.} \cdot V_{cap.})$$

$$(2) PI_{Losses} = (\alpha_{ind.} \cdot Loss_{ind.} + \alpha_{sem.} \cdot Loss_{sem.} + \alpha_{cap.} \cdot Loss_{cap.})$$

$$PI_{Weight} = (\alpha_{ind.} \cdot W_{ind.} + \alpha_{sem.} \cdot W_{sem.} + \alpha_{cap.} \cdot W_{cap.})$$

$$PI_{Price} = (\alpha_{ind.} \cdot \$_{ind.} + \alpha_{sem.} \cdot \$_{sem.} + \alpha_{cap.} \cdot \$_{cap.})$$

gdzie  $\alpha_{ind.}$ ,  $\alpha_{sem.}$ ,  $\alpha_{cap.}$  są współczynnikami wagowymi dla poszczególnych elementów układu a  $V$ ,  $Loss.$ ,  $W$ ,  $\$$  wskaźnikami jakości.

### Implementacja systemu

System został opracowany w konwencji aplikacji internetowej. Dzięki temu zapewnione są łatwy dostęp do aktualnej wersji aplikacji oraz możliwość wykorzystania znacznych zasobów sprzętowych. Aplikacja została stworzona w języku Java z wykorzystaniem biblioteki Grails. Skrypty obliczeniowe odpowiedzialne za wyznaczenie wektorów parametrów ogólnych oraz wartości wskaźników lokalnych związanych z poszczególnymi komponentami układu uruchamiane są równoległe w osobnych procesach obliczeniowych środowiska GNU Octave. System funkcjonuje na wirtualnej maszynie z systemem Linux, Ubuntu i ma przydzielone 8 wirtualnych procesorów w technologii Intel Xeon X5460 taktowanych zegarem 3.16GHz oraz 4GB pamięci RAM. Baza danych komponentów, zestawów wektorów parametrów ogólnych oraz wyników Pareto- optymalnych znajduje się na serwerze baz danych MySQL na tej samej maszynie. Algorytmy ewolucyjne do wyznaczania frontu Pareto zostały zaczerpnięte z biblioteki MOEA Framework [13].

Procedura optymalizacji podzielona jest na trzy zasadnicze etapy:

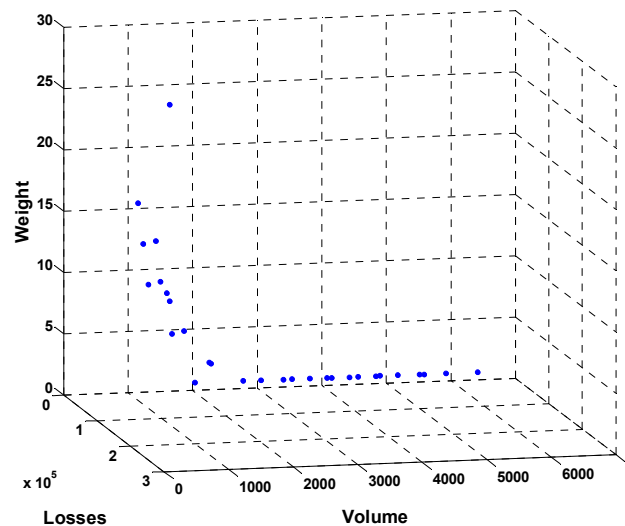
1. nadanie indeksów porządkowych każdemu komponentowi (łącznikom energoelektronicznym, dławikom oraz kondensatorom),
2. wyznaczenie zbiorów pasujących komponentów do każdego wektora parametrów ogólnych,
3. uruchomienie właściwej procedury optymalizacji.

Czas wykonania dwóch pierwszych etapów związany jest z rozmiarem bazy komponentów oraz liczbą wierszy w tablicy wektorów parametrów ogólnych. Długość wykonywania zasadniczego trzeciego etapu związana jest z samą procedurą optymalizacji za pośrednictwem współczynnik określającego maksymalną liczbę ewaluacji funkcji celu ( $n_e$ ). Liczba ta przekłada się bezpośrednio na liczbę generacji algorytmu ewolucyjnego. Na przykład dla rozmiaru populacji równego 50 osobników przy liczbie  $n_e = 500$  wygenerowane zostanie 10 generacji osobników.

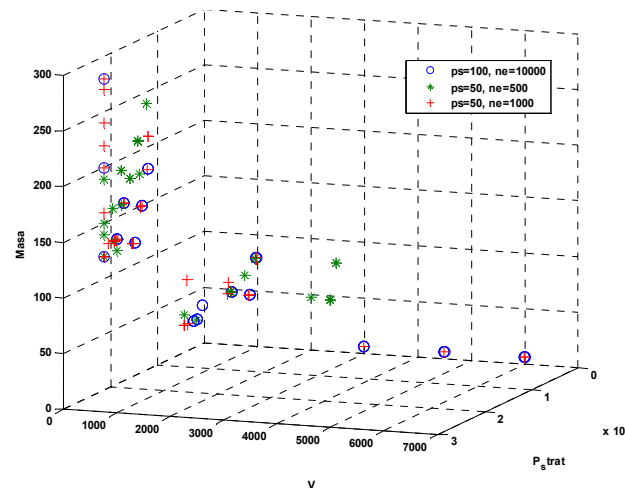
### Wyniki optymalizacji

W celu weryfikacji poprawnego działania systemu wygenerowana została baza danych zawierająca 300 rekordów z łącznikami mocy, 100 rekordów z kondensatorami oraz 100 z dławikami. Obliczenia przeprowadzono dla przekształtnika o mocy 10 kW,

zakresie częstotliwości 20-100 kHz (zakładana aplikacja przyrządów mocy z węgla krzemu) oraz zmian napięcia  $U_{DC}$  w zakresie 580-750 V. W obliczeniach analizowano filtr typu LCL. Przy zakresie zmiana  $f_{sw\_STEP} = 1$  kHz i  $U_{DC\_STEP} = 5$  V po wykonaniu procedury doboru parametrów ogólnych uzyskano 2855 wektorów z parametrami, co przy zastosowanej bazie danych daje  $85,65 \cdot 10^5$  możliwych kombinacji. Czas wykonania algorytmu NSGAIII dla populacji liczącej  $p_s = 100$  osobników przy  $n_e = 10000$  ewaluacji dla wszystkich elementów układu wynosi około 6 minut. Przykładowy zbiór rozwiązań Pareto- optymalnych dla tej aplikacji z preferencją minimalizacji strat mocy został przedstawiony na rysunku 8.



Rys.8. Zbiór rozwiązań Pareto- optymalnych uzyskany dla analizowanej bazy danych, przy  $85,65 \cdot 10^6$  możliwych kombinacjach możliwych rozwiązań



Rys.9. Porównanie zbiorów rozwiązań Pareto- optymalnych uzyskany dla różnej liczby ewaluacji funkcji celu

Na rysunku 9 zaprezentowane zostało porównanie frontów Pareto dla różnych liczb ewaluacji funkcji celu. W celu znalezienia dokładnego frontu Pareto uruchomiona została procedura optymalizacji z bardzo dużą liczbą ewaluacji celu równą  $n_e = 10000$  co było związane z czasem wykonywania około 6 minut (symbol 'o'). Wynik ten został uznany za referencyjny. W celu określenia wystarczającej liczby ewaluacji funkcji celu uruchomiona została procedura optymalizacji dla  $n_e = 500$  (czas obliczeń 1 minuta 20 sekund) oraz  $n_e = 1000$  (czas obliczeń około 1 minuta 40 sekund). Na rysunku 9 można zauważyć, że dla

testowanej bazy danych liczba ewaluacji równa 500 (symbol '\*') jest niewystarczająca aby odnaleźć wyniki Pareto-optymalne z prawego dolnego rogu wykresu. Jednak już dla  $n_c = 1000$  oraz rozmiarze populacji  $p_s = 50$  (symbol '+') wyniki te zostały odnalezione. Zatem dla optymalizacji która trwała około półtorej minuty uzyskano optymalny front Pareto względem przyjętego wyniku referencyjnego.

Przykładowa realizacja oraz badania eksperymentalne przekształtnika zoptymalizowanego na podstawie opracowanej procedury w celu minimalizacji strat mocy została przedstawiona w [14] oraz [15].

## Podsumowanie i wnioski

Artykuł prezentuje system doboru i optymalizacji parametrów przekształtnika sieciowego AC-DC. Celem prowadzonych badań jest usystematyzowanie wiedzy z zakresu projektowania przekształtników sieciowych poprzez stworzenie uniwersalnego narzędzia wspomagającego proces projektowania urządzenia oraz umożliwiającego optymalizację parametrów projektowych pod kątem spełnienia założonych wymagań.

Istotnymi cechami opracowanego systemu są jego uniwersalność oraz elastyczność - poszczególne komponenty systemu przekazują sobie wyniki obliczeń, natomiast same obliczenia projektowe i optymalizacyjne realizowane są za pomocą skryptów obliczeniowych, które mogą być dowolnie modyfikowane, w zależności od potrzeb. Schemat ideowy działania systemu oraz wywoływanych skryptów obliczeniowych zobrazowano na rysunku 6.

Dzięki zastosowaniu dedykowanego skryptu obliczeniowego przedstawiona procedura doboru parametrów ogólnych układu (wartości elementów filtru po stronie sieci, poziom napięcia  $U_{DC}$ , pojemność obwodu DC, częstotliwość łączeń) ma charakter uniwersalny. Procedura bazuje na wiedzy i doświadczeniu autorów z zakresu projektowania układów przekształtnikowych i zapisana jest w postaci równań matematycznych – możliwa jest jednak dowolna modyfikacja skryptu, tak by uzyskać pożądane właściwości układu, dopasowane np. do realizowanej funkcjonalności, topologii lub konkretnego algorytmu sterowania.

Aby uzyskać dokładniejsze wyniki obliczeń należy odpowiednio zmodyfikować skrypty wyznaczające cząstkowe wskaźniki jakości poszczególnych komponentów układu lub odwrotnie, aby przyspieszyć czas wykonywania obliczeń wystarczy uprościć skrypty obliczeniowe. Zaimplementowane skrypty, bazujące na wiedzy i doświadczeniu autorów są kompromisem między czasem wykonywania obliczeń a ich dokładnością, pozwalając na uzyskanie poprawnych wyników wykorzystywanych w procesie optymalizacji w stosunkowo krótkim czasie.

Prezentowane wyniki mają charakter wyników wstępnych, demonstrujących koncepcję i możliwości zaproponowanego systemu oraz zasadę jego działania.

*Praca jest częścią projektu badawczego „Badania i rozwój procedur optymalizacji wielokryterialnej nowoczesnych przekształtników AC-DC w szczególności dla systemów energetyki odnawialnej / rozproszonej”, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji nr DEC-2012/05/B/ST7/01183.*

**Autorzy:** mgr inż. Szymon Piasecki, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [szymon.piasecki@ee.pw.edu.pl](mailto:szymon.piasecki@ee.pw.edu.pl), dr inż. Robert Szmurło, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, Zakład Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Stosowanej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [robert.szmurlo@ee.pw.edu.pl](mailto:robert.szmurlo@ee.pw.edu.pl), prof. dr hab. inż. Marian P. Kaźmierkowski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [mpk@isep.pw.edu.pl](mailto:mpk@isep.pw.edu.pl), dr hab. inż. Jacek Rąbkowski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [jacek.rabkowski@ee.pw.edu.pl](mailto:jacek.rabkowski@ee.pw.edu.pl)

## LITERATURA

- [1] Teodorescu R., Liserre M., and Rodríguez P., Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. *John Wiley & Sons, Inc.*, (2011)
- [2] Grigsby L. L., Electric Power Generation, Transmission, and Distribution. The Electric Power Engineering Handbook, Third Edit. CRC Press, Taylor & Francis Group, (2012)
- [3] Kolar J. W., Friedli T., Rodriguez J., and Wheeler P. W., Review of Three-Phase PWM AC-AC Converter Topologies, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58 (2011), n.11, 4988–5006
- [4] Kolar J. W., Biela J., Waffler S., Friedli T., and Badstuebner U., Performance trends and limitations of power electronic systems, 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), (2010), 1–20
- [5] Busquets-Monge S., Soremekun G., Hefiz E., Crebier C., Ragon S., Boroyevich D., Gurdal Z., Arpilliere M., Lindner D. K., Power Converter Design Optimization, *IEEE Industry Applications Magazine*, 10 (2004), n.1, 32-38
- [6] Branke J., Deb K., Miettinen K., Słowiński R., Multiobjective Optimization, Interactive and Evolutionary Approaches. Springer, (2008)
- [7] Marler R. T., Arora J. S., Survey of multi-objective optimization methods for engineering, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 26 (2004), n. 6, 369–395
- [8] Piasecki S., Szmurło R., Jasiński M., Brief View of Multi-Objective Optimization Approaches Used for Design AC-DC Power Electronics Converters, 14th International Symposium “Topical Problems In The Field Of Electrical And Power Engineering”, Parnu, Estonia, (2014), 185-192
- [9] Piasecki S., Szmurło R., Jasiński M., Design of Grid Connected AC-DC Converter using Multi-Objective Optimization, *The Scientific Journal of Riga Technical University - Electrical, Control and Communication Engineering*, (2014), n.5, 11-19
- [10] Piasecki S., High Order Line Filters for Grid Connected AC-DC Converter – Parameters Selection and Optimization, 23rd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Stambuł, Turcja, (2014), 2687- 2692
- [11] Righers K., Schroder S., Durbaumt T., Wendtt M., and De Doncker R. W., Integrated Method for Optimization of Power Electronic Circuits, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), (2004), 4473–4478
- [12] Zitzler E., Laumanns M., Bleuler S., A Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization, Conference In Metaheuristics for Multiobjective Optimization, (2003), 3-38
- [13] <http://www.moeaframework.org/javadoc/index.html> - biblioteka algorytmów ewolucyjnych, (2015)
- [14] Rąbkowski J., Piasecki S., Kaźmierkowski M. P., Design of a Three-phase AC/DC Converter with Paralleled SiC MOSFETs, 6th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), Antalya, Turcja (2014), 621-627
- [15] Piasecki S., Rabkowski J., Experimental Investigations on the Grid-connected AC/DC Converter Based on Three-phase SiC MOSFET Module, 17<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE ECCE Europe), Geneva, Switzerland, (2015), 1-10