

doi:10.15199/48.2022.09.13

# Minimalizacja prądu jałowego transformatora w stanie asymetrii napięć fazowych z wykorzystaniem przekształtników czterogałęziowych

**Streszczenie** W artykule przedstawiono problem jakim jest wpływ asymetrii prądów fazowych oraz kierunku przepływu energii na prąd jałowy transformatora w konfiguracji uzwojeń gwiazda trójkąt. Zaproponowany sposób rozwiązania problemu oparty jest na równoległym podłączeniu do sieci nN przekształtnika AC/DC z magazynem energii, który posiada możliwość niezależnego sterowania mocą czynną i bierną w każdej z faz. Przeprowadzone badania wykazały słuszność zaproponowanego rozwiązania.

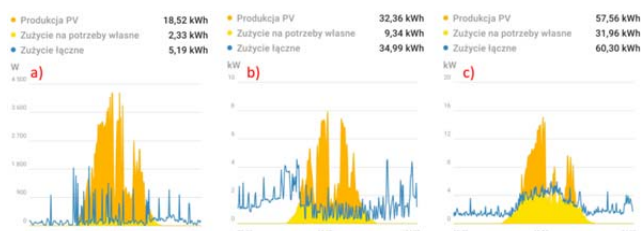
**Abstract.** The paper presents the problem of the influence of phase current asymmetry and the direction of energy flow on the idle current of a transformer in star-delta winding configuration. The proposed method of solving the problem is based on the parallel connection to the LV network of an AC/DC converter with energy storage, which has the ability to independently control the active and reactive power in each phase. The conducted tests showed the validity of the proposed solution. **(The problem of the influence of phase current asymmetry and the direction of energy flow on the idle current of a transformer in star-delta winding configuration)**

**Słowa kluczowe:** Przekształtnik czterogałęziowy AC/DC, Symetryzacja mocy w sieci niskiego napięcia, niezależne sterowanie mocą w każdej z faz przekształtnik AC/DC, magazynowanie energii elektrycznej.

**Keywords:** Four-leg AC / DC converter, Power symmetrization in the low-voltage network, independent power control in each phase, AC / DC converter, electricity storage.

## Wstęp

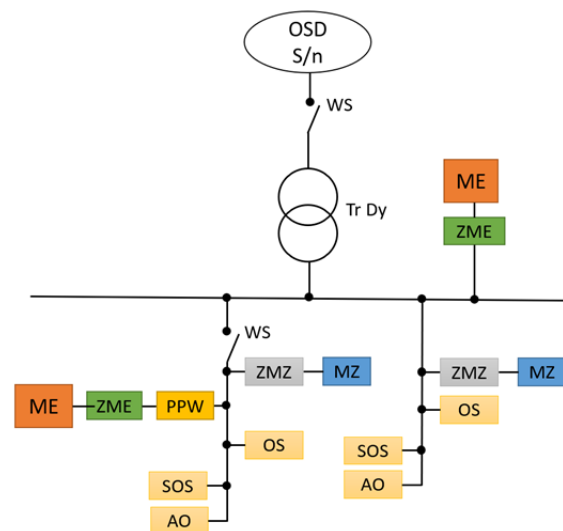
Szybko postępujący rozwój elektromobilności wynikający z dyrektywy AFID (Alternative Fuels Infrastructure of Development) Unii Europejskiej [1,2], narastająca w dynamiczny sposób ilość podłączanych źródeł wytwórczych wykorzystujących odnawialne źródła energii oraz zwiększająca się ilość odbiorników jednofazowych dużej mocy np. pomp ciepła, sprawia, że sieć dystrybucyjna niskiego napięcia (nN) wykorzystywana jest w sposób, do którego nie została przystosowana podczas jej projektowania. Znaczna część sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia zaprojektowana została z założeniem, że przepływ energii odbywać się będzie w kierunku od Głównego Punktu Zasilania (GPZ) do końcowego odbiorcy podłączonego do sieci niskiego napięcia. Jednakże duża ilość podłączanych źródeł wytwórczych opartych o odnawialne źródła energii np. instalacje fotowoltaiczne powoduje, że ilość wyprodukowanej energii w określonych porach dnia jest większa niż zapotrzebowanie prosumenta [3-4]. Przykład przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zestawienie dobowej produkcji i zużycia energii z instalacji PV w przypadku: a) domu jednorodzinnego ogrzewanego konwencjonalnie, b) domu jednorodzinnego ogrzewanego z wykorzystaniem pomp ciepła, firmy handlowo-usługowej.

Sprawa to, że wyprodukowana energia zaczyna przepływać od prosumenta do GPZ. Powielenie takiej sytuacji u większości prosumentów podłączonych do tej samej linii sieci nN przekłada się na podwyższenie amplitud napięcia fazowego co w konsekwencji skutkuje przekroczeniem 110 % wartości RMS napięcia fazowego określonego w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci

Dystrybucyjnej [5]. Wystąpienie takiego przypadku oznacza odłączenie i przerwanie generacji energii przez mikroźródła do momentu powrotu napięć fazowych do wartości mieszczących się w zakresie 110 % wartości znamionowego napięcia sieci nN. Dlatego też w przyszłości niezbędne będzie optymalizowanie wydajności systemów fotowoltaicznych poprzez instalowanie magazynów energii, które zmagazynują nadwyżki energii i odciążą sieć średniego napięcia Sn. Schemat sieci dystrybucyjnych niedalekiej przyszłości przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat sieci nN z infrastrukturą optymalizującą wykorzystanie mikroźródeł. WS – Wyłącznik Sterowany, Tr Dy – Transformator z uzwojeniem pierwotnym w układzie trójkąta, z uzwojeniem wtórnym w układzie gwiazdy, ME – Magazyn energii, ZME – Układ Zarządzający Magazynem Energii, MZ – Mikroźródło, ZMZ – Układ Zarządzający Mikroźródłem, OS – Obciążenie Symetryczne, SOS – Sterowane Obciążenie Symetryczne, AO – Asymetryczne Obciążenie, PPW – Przekształtnik AC/DC z możliwością Pracy Wyspowej

Kolejną niezwykle istotną kwestią jest asymetryczny sposób obciążania sieci. Mikroźródła podłączone są do sieci

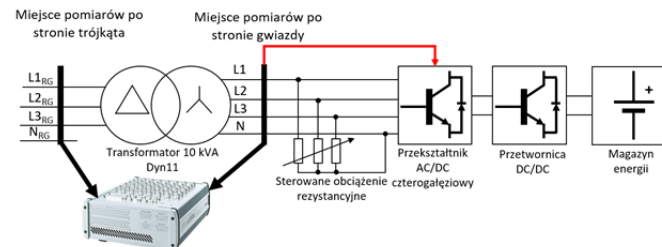
nN z wykorzystaniem przekształtników DC/AC, które w większości przypadków są źródłami trójfazowymi [6]. Generują one prąd o takiej samej amplitudzie w każdej z faz. Problemem okazują się odbiory podłączane przez prosumenta. Większość urządzeń podłączanych do sieci nN przez prosumenta jest zasilanych z wykorzystaniem jednej z faz i przewodu neutralnego, w tym klimatyzatory czy pompy ciepła, które charakteryzują się poborem mocy na poziomie od kilkuset watów do kilku kW. Skutek jest taki, że sumarycznie wszystkie odbiory prosumenta obciążają sieć w sposób asymetryczny. W związku z tym często okazuje się, iż pomiar mocy wykonywany na przyłączy prosumenta wykazuje, że w jednej bądź dwóch fazach prąd przepływa w kierunku sieci. Opisane sytuacje mają również bezpośrednie przełożenie na asymetrię napięć i kątów fazowych [7]. Taka anomalia wpływa na poprawność działania podłączonych maszyn elektrycznych. Ich sprawność maleje a uzwojenia przegrzewają się co skutkuje skróceniem żywotności[8]. Podobnie jest w przypadku transformatorów, ich prądy jałowe wzrastają powodując ich zmniejszenie sprawności i wzrost temperatury uzwojeń [8].

Przedstawione problemy sprawiają, że parametry jakościowe energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych ulegają pogorszeniu. Asymetryczne obciążenie sieci powoduje, zmniejszenie jej możliwości przyjmowania energii wytworzonej przez przyłączone mikroźródła. W artykule autorzy skupili się na symetryzacji obciążeń oraz cyrkulacji mocy bierniej po stronie uzwojeń połączonych w trójkąt transformatora Dyn. Jest to najczęściej stosowana konfiguracja uzwojeń transformatorów używanych w sieciach dystrybucyjnych nN. Opisany problem jest rozważany w literaturze. W artykule „Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć”[9] autorzy proponują rozwiązanie w postaci równoległe podłączonego transformatora symetryzującego z uzwojeniami połączonymi w zygzak. Natomiast w artykule „Regulacja napięcia w sieci nN z rozproszonymi źródłami energii” autor proponuje zastosowanie energoelektronicznego regulatora napięcia [10]. Autorzy tego artykułu zaproponowali rozwiązanie oparte na czterogąłęziowym przekształtniku AC/DC z magazynem energii, które zniwelowało powstałe problemy. W tym celu stworzono stanowisko badawcze, które pozwoliło na zarejestrowanie opisanych anomalii. W następnym kroku z wykorzystaniem platformy dSPACE MicroLabBox oraz środowiska Matlab Simulink opracowano algorytm i wykonano pomiary, na podstawie których opracowano wnioski końcowe.

### Stanowisko badawcze

W ramach przeprowadzanych badań autorzy skonstruowali stanowisko, którego schemat przedstawiono na rysunku 3. Stanowisko badawcze składa się z transformatora firmy Breve model: T3M 10002/A o konfiguracji uzwojeń Dyn11 i mocy znamionowej 10 kVA. Od strony uzwojeń skonfigurowanych w trójkąt został on podłączony do sieci elektroenergetycznej. Do uzwojenia wtórnego połączonych w gwiazdę zostało podłączone sterowane obciążenie rezystancyjne, dzięki któremu istniała możliwość wywołania asymetrii wartości prądów między poszczególnymi fazami. Za obciążeniem podłączono skonstruowany przekształtnik czterogąłęziowy zintegrowany z magazynem energii. Został on zbudowany w ramach projektu „Zarządzanie pracą sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia z uwzględnieniem aktywnej roli prosumenta” o numerze POIR.04.01.02-00-0007/17. Jego podstawową funkcjonalnością jest możliwość niezależnego sterowania mocą czynną w każdej z faz. Dodatkowo dzięki

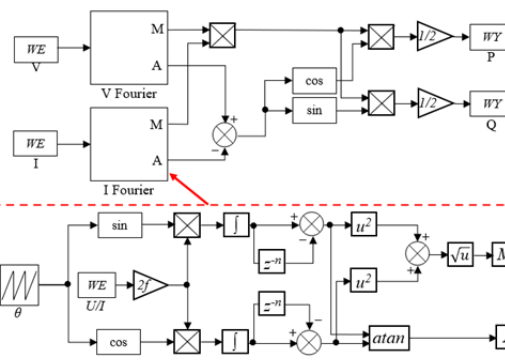
rozbudowanym algorytmom sterowania możliwe jest sterowanie mocą bierną w każdej z faz oraz magazynowanie nadwyżek produkowanej energii z mikroźródeł w zintegrowanym magazynie energii. Na schemacie dodatkowo czerwoną strzałką połączono pomiary napięcia i prądu z przekształtnikiem AC/DC. Takie połączenie jest zrealizowane w celu pobrania sygnału prądowego do wyznaczenia wartości referencji symetryzujących prądy przewodowe w transformatorze po stronie uzwojeń połączonych w gwiazdę.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

Pomiary wykonano po dwóch stronach transformatora. Pierwszy pomiar wykonano w rozdzielni głównej względem przewodu neutralnego (pomiary z przyrostkiem RG). Od strony uzwojeń połączonych w gwiazdę użyto identycznego ustroju pomiarowego.

Pomiarów dokonano wykorzystując platformę dSPACE MicroLabBox wraz z przekładnikami prądowymi firmy LEM model HTR 200-SB oraz czujnikami do pomiaru napięcia firmy LEM model LV25P. Cały ustrój pomiarowy został wycechowany z użyciem analizatora mocy firmy Kyoritsu model kew 6310. Do przetworzenia zarejestrowanych pomiarów użyto opracowanego algorytmu, który opiera się na dyskretnej transformacji Fouriera. Na rysunku 4 przedstawiono implementację algorytmu w formie blokowej. W czerwonej ramce przedstawiono część algorytmu która jest powielona zarówno dla sygnału napięciowego jak i prądowego.



Rys. 4. Uproszczona interpretacja blokowa algorytmu obliczającego parametry mocy (pierwsza harmoniczna), M – amplituda, A- przesunięcie fazowe, P – moc czynna, Q – moc bierna

Tabela 1. Parametry przekształtnika AC/DC i magazynu energii

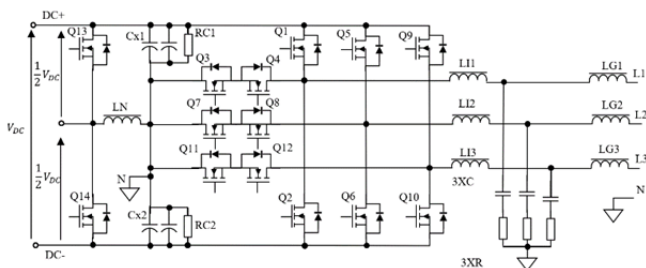
Parametr	Wartość
Moc wyjściowa przekształtnika [kVA]	10
Pojemność magazynu energii [kWh]	10
Napięcie szyny DC przetwornicy AC/DC [V]	750
Znamionowe napięcie magazynowania energii [V]	54
Pojemność szyny DC [mF]	10
Częstotliwość odcięcia wyjściowego filtra LCL [kHz]	2,8
Parametry filtra LCL [mH, µF, mH]	1,2+5+0,38
THDi (przy obciążeniu powyżej 50%) [%]	<3

Na podstawie zastosowanego algorytmu, wyliczono wartość sygnału podstawowego dla napięć i prądów

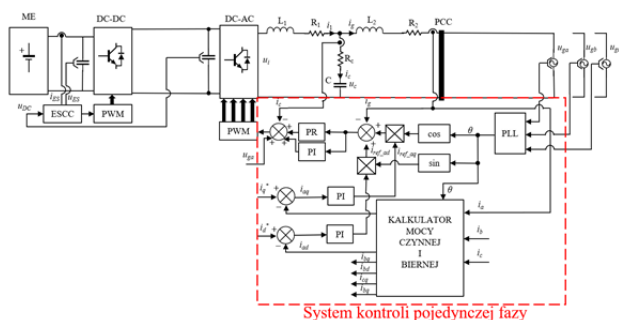
fazowych oraz ich kąty. Dzięki tym sygnałom określono wartości przesunięć fazowych między sygnałami napięciowymi i prądowymi odpowiednio dla każdej z faz, co pozwoliło na obliczenie wartości mocy czynnej i biernej dla każdej z faz po obu stronach transformatora.

Do badań użyto trójpoziomowego czterogłęziowego przekształtnika AC/DC z wyprowadzonym przewodem neutralnym. Parametry przekształtnika i magazynu przedstawiono w tabeli 1.

Przekształtnik wykonany został zgodnie z topologią przedstawioną na rysunku 5. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania zaistniała możliwość wyprowadzenia przewodu neutralnego co pozwala na niezależną kontrolę przepływu prądów w każdej z faz oraz zmniejszenie filtrów wyjściowych LCL. Dodatkowo zainstalowano wspomagający półmostek tranzystorowy pomiędzy punktem neutralnym i biegunami szyny DC. Takie rozwiązanie pozwala na dynamiczne balansowanie szyny DC [11-13]. Przekłada się to bezpośrednio na możliwość asymetrycznej pracy z dużą mocą na wyjściu przekształtnika. Magazyn energii i przekształtnik AC/DC połączono za pomocą dwukierunkowej izolowanej przetwornicy DC/DC, która ma za zadanie nie tylko ładować i rozładowywać magazyn, ale także zapewniać separację galwaniczną między zasobnikiem energii a siecią elektroenergetyczną. Do kontroli zastosowano algorytm oparty na sprawdzeniu przesunięcia fazowego Phase-Shift Control (PSC) [14]. Na rysunku 6 zilustrowano schemat połączeń między komponentami oraz po stronie AC schemat sterowania napięciem jednej z faz. Takie uproszczenie zostało dokonane dla przejrzystości rysunku. W związku z tym, cały algorytm sterowania składa się, z trzech takich samych algorytmów sterowania (zaznaczonych na rys. 6 czerwoną ramką).



Rys.5. Topologia przekształtnika AC/DC



Rys. 6. Uproszczony algorytm sterowania proporcjonalno – rezonansowego przetwornika dla jednej fazy, ME – magazyn energii, ESCC- kontroler prądu magazynu energii, DC-DC – przetwornica DC/DC, PCC- punkt pomiarowy, PLL – układ synchronizacji z siecią elektroenergetyczną, PWM – modulowany sygnał sterujący pracami przekształtników AC/DC i DC/DC

Algorytm oparty jest na proporcjonalno-rezonansowych regulatorach odpowiadających za 1,3,5,7,9 harmoniczną. Opierają się one na sparametryzowanych filtrach o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (IIR) [15-16].

Nastawy regulatorów dobierane są w taki sposób, aby regulator uzyskiwał maksymalne wzmocnienie harmonicznej dla danej częstotliwości przy zachowaniu odpowiedniej rezerwy fazowej. Dodatkowo dołączono równoległe regulator PI, dzięki czemu eliminowana jest możliwość wystąpienia składowej stałej. Transmitancję opisującą algorytm sterowania oraz charakterystykę amplitudowo-fazową z uwzględnieniem filtra wyjściowego LCL przekształtnika przedstawiono we wzorze 1.

$$(1) \quad G_i = K_{pl\_1H} + \sum_{n=1,3,5,7,9}^N \frac{K_{il\_nH} 2\omega_{rc1\_nH} S}{s^2 + 2\omega_{rc1\_nH} S + \omega_{o\_nH}^2} \left( \frac{G_d}{K_{vdc\_fdbk}} \right) G_{LCL} \cdot G_n$$

Gdzie:  $G_i$  – transmitancja regulatora rezonansowego,  $K_{pl\_nH}$  – wzmocnienie regulatora PI,  $n$  – rząd harmonicznej,  $\omega_{rc1\_nH}$  – częstotliwość odcięcia,  $K_{il\_nH}$  – indywidualne wzmocnienie rezonansowe dla  $n$ -tej harmonicznej,  $\omega_0$  – częstotliwość podstawowa filtra,  $K_{vdc\_fdbk}$  – wzmocnienie należne do napięcia na szynie DC,  $G_d$  – wzmocnienie przekształtnika mocy,  $G_{LCL}$  – transmitancja filtra LCL,  $G_n$  – transmitancja filtra wycinającego.

W bloku pod nazwą kalkulator mocy czynnej i biernej znajduje się algorytm oparty na Ortogonalnym Generatorze Sygnałów (OSG) [17]. Jego zasada działania polega na wprowadzeniu przesunięcia fazowego o  $90^\circ$  odpowiadającego składowej podstawowej sygnału wejściowego. W tej implementacji zastosowano system OSG oparty na filtrze SOGI, ponieważ jest to adaptacyjny system filtrowania i zachowuje się jak całka uogólniona. Zastosowaną metodę opisują wzory 2, 3.

$$(2) \quad P = \frac{1}{2} (v_{g\alpha} i_{g\alpha} + v_{g\beta} i_{g\beta})$$

$$(3) \quad Q = \frac{1}{2} (v_{g\beta} i_{g\alpha} - v_{g\alpha} i_{g\beta})$$

Gdzie indeksy „g $\alpha$ ” i „g $\beta$ ” oznaczają składowe „ $\alpha$ ” i „ $\beta$ ” napięcia/prądu sieci w  $\alpha\beta$ -stacjonarnym układzie odniesienia.

Dzięki zastosowanej wskazanej topologii oraz przyjętemu sposobowi sterowania, przekształtnik jest w stanie niezależnie w każdej z faz pobierać lub wydawać moc czynną oraz bierną. Na rysunku 7 przedstawiono przekształtnik wraz z podłączonym magazynem energii.



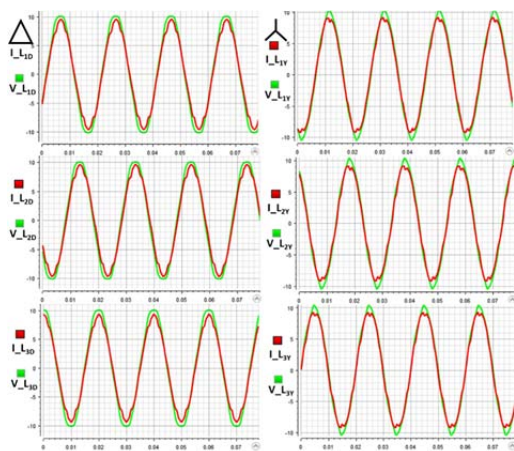
Rys. 7. Stanowisko użyte do badań a) magazyn energii firmy BMZ Poland 10 kWh, b) przekształtnik czteroprzewodowy

### Badania Laboratoryjne

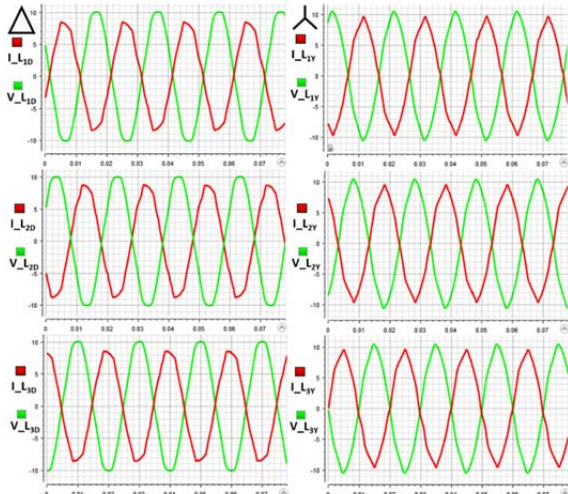
Do przeprowadzenia badań laboratoryjnych użyto sprzętu opisanego w poprzednim rozdziale. W trakcie badań



wykonano 20 pomiarów przy różnych wartościach mocy czynnej wydawanej z przekształtnika AC/DC oraz o różnych wartościach rezystancji obciążenia podłączonego równoległe pomiędzy transformatorem a przekształtnikiem AC/DC (zgodnie ze schematem z rysunku 2). Po przeprowadzonej analizie wybrano trzy najbardziej reprezentatywne pomiary. Pomiar pierwszy polegał na pobieraniu przez układ mocy czynnej z sieci przez transformator o wartości 1500 W przez każdą z faz. Wyniki tego pomiaru przedstawiono na rysunku 8 oraz tabeli 2. Drugi pomiar polegał na oddawaniu do sieci przez transformator mocy czynnej w sposób symetryczny o wartości 1500 W przez każdą z faz. Wyniki tego pomiaru przedstawiono na rysunku 9 oraz tabeli 3. Trzeci pomiar polegał na tym, że fazą  $L_1$  układ pobierał moc czynną o wartości 1500 W z sieci zaś fazami  $L_2$  i  $L_3$  wydawał moc czynną o wartości 1500 W do sieci. Wyniki tego pomiaru przedstawiono na rysunku 10 oraz tabeli 4. W celu zachowania większej przejrzystości wykresów sygnał napięciowy (zielony) został przeskalowany 32,5 razy.



Rys. 8. Pomiary napięć i prądów dla fazy  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  uzwojenia transformatora skonfigurowanego w trójkąt i gwiazdę przy symetrycznym pobieraniu mocy czynnej z sieci



Rys. 9. Pomiary napięć i prądów dla fazy  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  uzwojenia transformatora skonfigurowanego w trójkąt i gwiazdę przy symetrycznym oddawaniu mocy czynnej do sieci

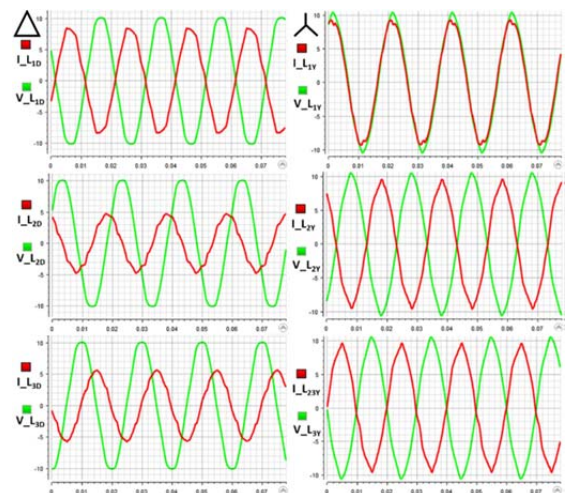
Tabela 2. Wartości parametrów sieci w przypadku I

Parametr	Wartości dla uzwojeń transformatora w trójkąt	Wartości dla uzwojeń transformatora w gwiazdę
Napięcie fazy $L_1$	236,78 V	228,53 V
Napięcie fazy $L_2$	236,24 V	226,84 V
Napięcie fazy $L_3$	235,15 V	226,84 V

Prąd przewodowy $L_1$	6,63 A	6,46 A
Prąd przewodowy $L_2$	6,69 A	6,38 A
Prąd przewodowy $L_3$	6,48 A	6,65 A
Moc czynna w fazie $L_1$	1571 W	1505 W
Moc czynna w fazie $L_2$	1582 W	1506 W
Moc czynna w fazie $L_3$	1520 W	1527 W
Moc bierna w fazie $L_1$	68 VAR (poj.)	46 VAR (ind.)
Moc bierna w fazie $L_2$	116 VAR (poj.)	22 VAR (ind.)
Moc bierna w fazie $L_3$	56 VAR (poj.)	14 VAR (ind.)
Suma mocy czynnych	4673 W	4538 W
Suma mocy biernych	240 VAR	82 VAR

Tabela 3. Wartości parametrów sieci w przypadku II

Parametr	Wartości dla uzwojeń transformatora w trójkąt	Wartości dla uzwojeń transformatora w gwiazdę
Napięcie fazy $L_1$	237,58 V	233,51 V
Napięcie fazy $L_2$	236,51 V	233,78 V
Napięcie fazy $L_3$	236,24 V	232,14 V
Prąd przewodowy $L_1$	-5,93 A	-6,40 A
Prąd przewodowy $L_2$	-6,21 A	-6,44 A
Prąd przewodowy $L_3$	-6,17 A	-6,41 A
Moc czynna w fazie $L_1$	-1412 W	-1510 W
Moc czynna w fazie $L_2$	-1470 W	-1506 W
Moc czynna w fazie $L_3$	-1454 W	-1497 W
Moc bierna w fazie $L_1$	138 VAR (poj.)	31 VAR (poj.)
Moc bierna w fazie $L_2$	179 VAR (poj.)	33 VAR (poj.)
Moc bierna w fazie $L_3$	140 VAR (poj.)	86 VAR (poj.)
Suma mocy czynnych	4336 W	4513 W
Suma mocy biernych	457 VAR	150 VAR



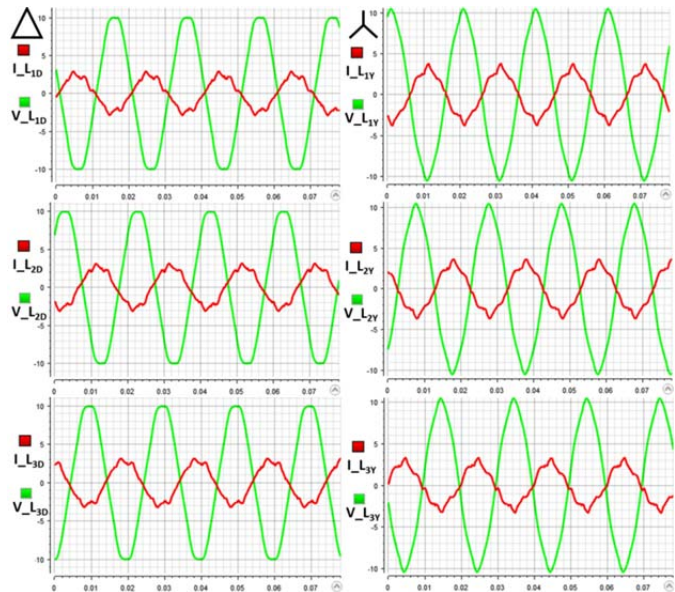
Rys. 10. Pomiary napięć i prądów dla fazy  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  uzwojenia transformatora skonfigurowanego w trójkąt i gwiazdę przy pobieraniu mocy czynnej z sieci przez fazę  $L_1$  oraz wydawaniu mocy czynnej do sieci przez fazę  $L_2$ ,  $L_3$

Tabela 4. Wartości parametrów sieci w przypadku III

Parametr	Wartości dla uzwojeń transformatora w trójkąt	Wartości dla uzwojeń transformatora w gwiazdę
Napięcie fazy $L_1$	232,96 V	227,40 V
Napięcie fazy $L_2$	235,15 V	228,56 V
Napięcie fazy $L_3$	232,96 V	228,56 V
Prąd przewodowy $L_1$	6,40 A	6,40 A
Prąd przewodowy $L_2$	-3,46 A	-6,40 A
Prąd przewodowy $L_3$	-4,24 A	-6,34 A
Moc czynna w fazie $L_1$	-1418 W	1500 W
Moc czynna w fazie $L_2$	11 W	-1514 W
Moc czynna w fazie $L_3$	34 W	-1497 W
Moc bierna w fazie $L_1$	112 VAR (poj.)	88 VAR (ind.)
Moc bierna w fazie $L_2$	765 VAR (ind.)	7 VAR (poj.)
Moc bierna w fazie $L_3$	917 VAR (poj.)	59 VAR (poj.)
Suma mocy czynnych	-1373 W	-1511 W
Suma mocy biernych	1794 VAR	154 VAR

Analizując otrzymane wyniki jednoznacznie można stwierdzić, że moc bierna pobierana przez transformator w uzwojeniach skonfigurowanych w trójkąt w zależności od przypadku różni się od siebie w znacznym stopniu. Tego zjawiska nie zaobserwowano w uzwojeniach skonfigurowanych w gwiazdę. Należy zaznaczyć, że przeprowadzone badania odbyły się wyłącznie z obciążeniem rezystancyjnym oraz przekształtnikiem AC/DC, który wydawał jedynie moc czynną, co potwierdził zainstalowany w obudowie przekształtnika analizator firmy LUMEL model ND20Lite. W przypadku I gdy energia była pobierana z sieci w sposób symetryczny przez transformator sumaryczna moc bierna wyniosła 240 VAR. W przypadku II gdy energia przepływała z układu z przekształtnikiem AC/DC przez transformator do sieci sumaryczna moc bierna wyniosła 457 VAR. Zatem moc bierna wymuszana przez transformator zwiększyła się prawie dwukrotnie. W III przypadku gdy energia przepływa w sposób asymetryczny tj. faza  $L_1$  pobiera energię z sieci a fazy  $L_2$  i  $L_3$  oddają energię do sieci wartość sumaryczna mocy bierniej wynosi 1794 VAR. Wobec tego w III przypadku transformator od strony uzwojeń połączonych w trójkąt pobiera z sieci ponad 7 razy więcej energii w formie mocy bierniej niż w pierwszym przypadku. Należy nadmienić, że pomiary mocy bierniej dla uzwojenia połączonych w trójkąt dla transformatora w stanie jałowym są tożsame z wynikami uzyskanymi tak jak w przypadku I gdzie pobór energii był symetryczny w kierunku od sieci do układu pomiarowego. Wynika z tego, że transformator w konfiguracji uzwojeń gwiazda/trójkąt stosowany najczęściej w sieciach dystrybucyjnych nN pobiera dużo większe ilości mocy bierniej w przypadku pracy asymetrycznej, szczególnie gdy prąd przepływający przez transformator ma różne znaki. Cyrkulacja mocy bierniej, którą zaobserwowano w III przypadku powoduje szereg nieudogodnień. Duże ilości mocy bierniej powodują nadmierne nagrzewania się transformatora, zmniejszają możliwości przesyłowe linii elektroenergetycznej oraz w przypadku przedsiębiorców wiążą się z dużymi karami finansowymi za przekroczenie określonych limitów.

Z przeprowadzonych badań wynika, że najbardziej szkodliwym przypadkiem jest praca transformatora z prądami o innych znakach na poszczególnych fazach. Zaproponowanym sposobem na rozwiązanie tego problemu jest równoległe podłączenie opisanego przekształtnika czteroprzewodowego z dodatkowymi pomiarami prądu u prosumenta w celu kompensacji lokalnej lub przy transformatorze w celu bilansowania sieci dystrybucyjnej. Dzięki dodatkowym pomiarom wyznaczono referencje zadanych prądów dla każdej z faz w taki sposób by wymusić symetryczny przepływ prądów przez transformator. Wyniki zaproponowanego rozwiązania przedstawiono na rysunku 11 i tabeli 5. Są one bezpośrednią odpowiedzią na przypadek III przedstawiony w tabeli IV, gdzie faza  $L_1$  pobiera energię z sieci a fazy  $L_2$  i  $L_3$  oddają energię do sieci a wartość sumaryczna mocy bierniej wynosi 1794 VAR. Na rysunku 12 przedstawiono moce czynne na poszczególnych fazach przekształtnika AC/DC. Moce czynne w fazach  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  są różnych wartości oraz znaków. Wynika to bezpośrednio z zastosowanego algorytmu, który dąży do symetryzacji prądów na zaciskach uzwojeń transformatora połączonych w gwiazdę. Skuteczność takiego rozwiązania ukazuje parametr sumarycznej mocy bierniej. Drugim zaproponowanym sposobem jest w przypadku oddawania energii do sieci w którejś z faz jej magazynowanie w zasobniku energii. Takie rozwiązanie dodatkowo zmniejsza cirkulację mocy bierniej po stronie sieci oraz jest uzasadnione ekonomicznie.



Rys. 11. Pomiary napięć i prądów dla fazy  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  uzwojenia transformatora skonfigurowanego w trójkąt i gwiazdę przy wymuszonym symetrycznym oddawaniu mocy czynnej do sieci przez przekształtnik czteroprzewodowy

Tabela 5. Wartości parametrów sieci w przypadku symetryzacji obciążenia sieci przekształtnikiem AC/DC

Parametr	Wartości dla uzwojeń transformatora w trójkąt	Wartości dla uzwojeń transformatora w gwiazdę
Napięcie fazy $L_1$	237,28 V	230,85 V
Napięcie fazy $L_2$	236,34 V	231,62 V
Napięcie fazy $L_3$	236,41 V	231,00 V
Prąd przewodowy $L_1$	-1,78 A	-2,25 A
Prąd przewodowy $L_2$	-1,96 A	-2,25 A
Prąd przewodowy $L_3$	-2,09 A	-1,98 A
Moc czynna w fazie $L_1$	-414 W	-518 W
Moc czynna w fazie $L_2$	-442 W	-515 W
Moc czynna w fazie $L_3$	-483 W	-450 W
Moc bierna w fazie $L_1$	60 VAR (poj.)	14 VAR (ind.)
Moc bierna w fazie $L_2$	134 VAR (poj.)	9 VAR (ind.)
Moc bierna w fazie $L_3$	84 VAR (poj.)	17 VAR (ind.)
Suma mocy czynnych	-1339 W	-1483 W
Suma mocy biernych	278 VAR	40 VAR



Rys. 12. Wartości mocy czynnych na wyjściu przekształtnika AC/DC w trybie pracy symetryzacji prądów transformatora płynących przez uzwojenia połączone w gwiazdę

### Wnioski

Reasumując, na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że asymetryczne obciążenie sieci prądami o różnych znakach prowadzi do powstania cirkulacji mocy bierniej po stronie trójkąta w transformatorze o konfiguracji uzwojeń Dyn11. Z uzyskanych pomiarów wynika, że



wartości mocy biernej w skrajnym przypadku są ponad siedem razy większe niż w warunkach znamionowych pracy transformatora. Zjawisko cyrkulacji mocy biernej m. in. zmniejsza możliwości przesyłowe sieci elektroenergetycznej co jest bardzo istotne dla dystrybutorów w odcinkach linii z dużą ilością podłączonych prosumentów. W przypadku przedsiębiorców obciąża ich to również dużymi karami finansowymi za przekroczenie określonych limitów mocy biernej. Dlatego też istotne jest niwelowanie tego zjawiska. Autorzy w artykule zaproponowali wykorzystanie zaprojektowanego przekształtnika AC/DC w topologii trójpoziomowej z wyprowadzonym przewodem neutralnym oraz połączenie go z zasobnikiem energii. Jest to rozwiązanie innowacyjne, które umożliwia niezależne sterowanie mocą czynną i bierną w każdej z faz. Dzięki temu w przypadku asymetrycznego obciążania transformatora istnieje możliwość zadania takich referencji, by prądy w uzwojeniach połączonych w gwiazdę były symetryczne i miały jednakowy znak. Dodatkowo dzięki zainstalowanemu zasobnikowi energii istnieje możliwość magazynowania nadwyżek wyprodukowanej energii. Jest to kluczowe dla prosumentów ponieważ w szczytach generacji OZE proponowane rozwiązanie gwarantuje stabilność pracy instalacji (zabezpiecza przed wyłączeniami falownika), co bezpośrednio przekłada się na większą rentowność inwestycji.

Zaprojektowany innowacyjny przekształtnik AC/DC zintegrowany z magazynem energii oraz sposób sterowania sprawiły, że w przypadku asymetrycznego obciążania transformatora prądami o przeciwnych znakach moc bierna w transformatorze po stronie trójkąta zmniejszyła się z wartości 1794 VAR do 278 VAR. Otrzymany wynik jest na poziomie mocy biernej z przypadku I, w którym przedstawiono wyniki transformatora obciążanego w sposób znamionowy. Dlatego autorzy uważają, że zastosowane rozwiązanie jest słuszne i należy je rozwijać.

Obecnie rozważana jest również możliwość kompensacji mocy biernej po stronie uzwojeń transformatora  $S_n$  połączonych w trójkąt. Temat ten będzie kontynuacją badań przedstawionych w tym artykule.

**Autorzy:** mgr inż. Bartłomiej Stefańczak Politechnika Lubelska Wydział Elektrotechniki i Informatyki. Katedra napędów i Maszyn Elektrycznych ul. Nadbystrzycka 38D 20-618 Lublin, E-mail: [b.stefanczak@pollub.pl](mailto:b.stefanczak@pollub.pl); Dr inż. Dariusz Zieliński Politechnika Lubelska Wydział Elektrotechniki i Informatyki. Katedra napędów i Maszyn Elektrycznych ul. Nadbystrzycka 38D 20-618 Lublin, E-mail: [d.zielinski@pollub.pl](mailto:d.zielinski@pollub.pl)

#### LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, EUR-Lex Access to European Union Law, EUR-Lex - 32014L0094 - EN - EUR-Lex (europa.eu), dostęp 12.03.2022
- [2] S. Helm, I. Hauer, M. Wolter, C. Wenge, S. Balischewski and P. Komarnicki, "Impact of unbalanced electric vehicle charging on low-voltage grids," 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 2020, pp. 665-669, doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248754
- [3] Sarwito, Sardon & Semin, Semin & Hanif, Muhammad. (2017). Analysis of unbalanced load effect of three phase transformer

- feedback 61-103 performance on the various connection windings. 146-150. 10.1109/ICAMIMIA.2017.8387575.
- [4] Grijalva S., Costley M. and Ainsworth N.: Prosumer-based control architecture for the future electricity grid. IEEE International Conference on Control Applications, Denver 2011, 28-30 [DOI: 10.1109/CCA.2011.6044467].
- [5] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Polska Grupa Energetyczna (pgedystrybucja.pl), dostęp 12.03.2022
- [6] Islam, M.; Mithulananthan, N.; Hossain, J.; Shah, R. Dynamic voltage stability of unbalanced distribution system with high penetration of single-phase PV units. In Proceedings of the The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018), Liverpool, UK, 17–19 April 2018; pp. 4074–4080
- [7] Albana, I. Effects of the Reactive Power Injection on the Grid—The Rise of the Volt/var Interaction Chain. Smart Grid Renew. Energy 2016, 7, 217–232.
- [8] Robak S., Pawlicki A., Pawlicki B.: Asymetria napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych. Przegląd Elektrotechniczny, 2014, R.90, nr7, 23-31
- [9] Topolski Ł., Woźny K., Hanzelka Z.: Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2019, R.95, nr. 9, 180-185
- [10] Krzemiński Z.: Regulacja napięcia w sieci nN z rozproszonymi źródłami energii. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2020, R.96, nr.5,25-38
- [11] Zhang, L.; Shi, D.; Jiang, W.; Yang, T.; Jin, C.; Zhang, Y.; Loh, W.K.; Tang, Y. Three-Phase-Four-Wire Three-Level Inverter with Neutral Inductor and Neutral Module for Saving AC-Filter-Inductances and DC-Link-Capacitances. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 11–15 October 2020; pp. 5656–5661.
- [12] Peng, H.; Yuan, Z.; Woldegiorgis, D.L.; Emon, A.I.; Narayanasamy, B.; Liu, Y.; Luo, F.; Mantooth, A.; Mhiesan, H.G. Practical Design and Evaluation of a High-Efficiency 30-kVA Grid-Connected PV Inverter with Hybrid Switch Structure. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 11–15 Oct. 2020; pp. 3670–3676.
- [13] Yuan, Z.; Deshpande, A.; Narayanasamy, B.; Peng, H.; Emon, A.I.; Whitt, R.; Nafis, B.M.; Luo, F.; Huitink, D. Design and Evaluation of A 150 kVA SiC MOSFET Based Three Level TNPC Phase-leg PEBB for Aircraft Motor Driving Application. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 29 September–3 October 2019; pp. 6569–6574.
- [14] Kumar B. M., Kumar A., Bhat A. H. and Agarwal P.: Comparative study of dual active bridge isolated DC to DC converter with single phase shift and dual phase shift control techniques, 2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), Noida 2017, 453-458 [DOI: 10.1109/RDCAPE.2017.8358314].
- [15] A. B. Acharya, D. Sera, L. E. Norum and R. Teodorescu, "Frequency Adaptive Digital Filter Implementation of Proportional-Resonant Controller for Inverter Applications," 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/COMPEL.2018.8459950.
- [16] N. Jain, S. Rathore and S. K. Singh, "Designing and Evaluation of the Reduced Order IIR Filter Design for Signal De-Noiseing," 2021 10th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2021, pp. 375-380, doi: 10.1109/CSNT51715.2021.9509567.
- [17] Yang Y. and Blaabjerg, F.: A new power calculation method for single-phase grid-connected systems. 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Taiwan 2013, pp. 1-6, [DOI: 10.1109/ISIE.2013.6563684.]