

Trójfazowe zasilacze awaryjne UPS i poprawa efektywności

Liao Jen-ch'uan Kuo ch'ao-lung
Delta Electronics, Inc.

Abstrakt

Rozwój przemysłu w obszarze nowych technologii i elektroniki półprzewodnikowej na Tajwanie idzie w parze z coraz wyższymi wymaganiami dotyczącymi jakości zasilania narzędzi precyzyjnych i urządzeń elektronicznych, które są niezbędne w procesach produkcyjnych. Wpływa to bezpośrednio na popyt na trójfazowe zasilacze awaryjne UPS o dużej mocy. Mając na uwadze kryzys energetyczny oraz efekt cieplarniany, ważnymi zagadnieniami, z którymi muszą zmierzyć się producenci zasilaczy awaryjnych UPS, stały się: wzrost sprawności, ograniczenie zużycia energii i zmniejszenie kosztów eksploatacji. Niniejsze opracowanie, po krótkim wprowadzeniu do topologii systemów trójfazowych zasilaczy awaryjnych UPS, opisuje metodę poprawy sprawności zasilaczy awaryjnych UPS poprzez dokonanie porównania topologii układu PFC (korekty współczynnika mocy) i topologii falownika, optymalizacji metod sterowania, wyboru kluczowych komponentów i podzespołów oraz sposobu działania trybu ECO o wysokiej sprawności. Jednocześnie praca zawiera krótki zarys obecnych przepisów międzynarodowych dotyczących sprawności zasilaczy awaryjnych UPS.

I. Wprowadzenie

Systemy zasilania bezprzerwowego/awaryjnego (UPS) wykorzystywane są głównie do zapewnienia stabilnego zasilania dla urządzeń o znaczeniu krytycznym. Pozwala to na uniknięcie utraty ważnych danych w wyniku niskiej jakości zasilania. Czynniki wpływające na jakość zasilania w energię elektryczną to m.in. zbyt wysokie lub zbyt niskie napięcie, przepięcia, szумы i migotania napięcia, brak równowagi faz, zniekształcenia harmoniczne, zaburzenia częstotliwości i zaniki zasilania. Mając na uwadze działania na

rzecz ograniczenia kryzysu energetycznego i efektu cieplarnianego, można spodziewać się, że zasilacze awaryjne UPS oprócz stabilnego źródła zasilania, co jest ich główną funkcją, będą zapewniać większą sprawność bez wpływu na ich niezawodność. Oprócz ochrony środowiska, taka poprawa sprawności energetycznej powodować będzie również zmniejszenie wydatków na energię elektryczną oraz kosztów operacyjnych. Jako przykład weźmy zasilacz awaryjny UPS o mocy 200 kW. Załóżmy, że jego sprawność podniesiona zostaje z 92% do 96%. Przy pracy pod pełnym obciążeniem daje to oszczędności na energii elektrycznej sięgające ok. 80,000 kWh rocznie. Jednocześnie zmniejsza się wydzielanie ciepła, spowodowane poprawą sprawności zasilaczy awaryjnych UPS, które może doprowadzić do obniżenia kosztów instalacji klimatyzatorów w centrach danych oraz ich poboru mocy. Oznacza to, że sprawność zasilaczy awaryjnych UPS stała się niezwykle ważnym zagadnieniem.

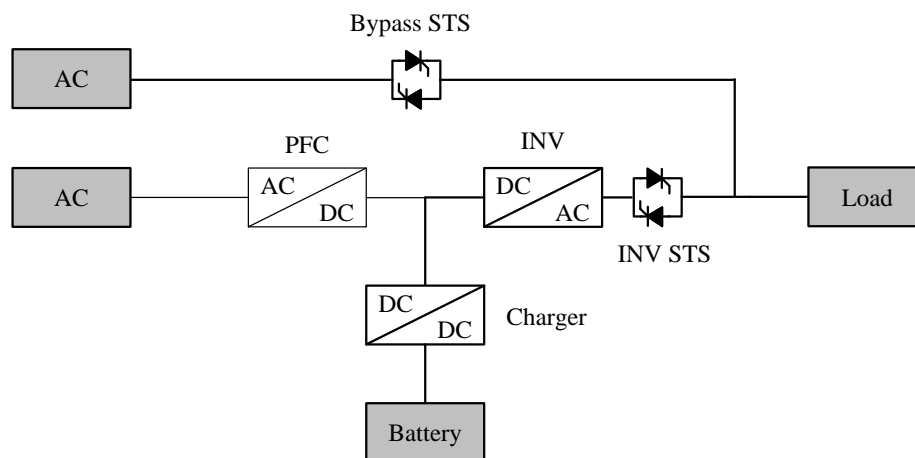
Niniejsze opracowanie składa się z następujących części: część druga zawiera omówienie podstawowych topologii trójfazowych systemów zasilaczy awaryjnych UPS oraz krótkie wprowadzenie do budowy zasilaczy awaryjnych UPS i ich trybów pracy; część trzecia stanowi przegląd obowiązujących przepisów międzynarodowych dotyczących sprawności zasilaczy awaryjnych UPS; część czwarta to opis topologii układów korekty współczynnika mocy (PFC) występujących w zasilaczach awaryjnych UPS z podwójną konwersją, analiza ich charakterystyk oraz przedstawienie ich wad i zalet; część piąta przedstawia topologie obwodów inwertera powszechnie stosowane w zasilaczach awaryjnych UPS, omawia ich właściwości oraz przedstawia ich wady i zalety; część szósta zawiera omówienie związku pomiędzy metodami sterowania zasilaczem awaryjnym UPS a jego sprawnością; część siódma zawiera opis i porównanie wyłączników zasilania i komponentów magnetycznych – kluczowych podzespołów zasilaczy awaryjnych UPS; część ósma to opis wysokowydajnego trybu pracy: ECO; w części dziewiątej przedstawiono wnioski.

II. Podstawowe topologie systemów zasilaczy awaryjnych UPS

Z uwagi na topologię, systemy zasilaczy awaryjnych UPS mogą być zaklasyfikowane jako zasilacze: online, line-interactive lub offline. W przypadku zastosowania zasilacza awaryjnego UPS typu offline, w normalnym trybie pracy, podłączone urządzenia zasilane są bezpośrednio z sieci elektrycznej. W razie wystąpienia awarii sieci elektrycznej, zasilanie dostarczane jest z baterii zasilacza awaryjnego UPS poprzez inwerter. Główną różnicą pomiędzy zasilaczem awaryjnym UPS typu line-interactive, a urządzeniem typu offline stanowi fakt, że w przypadku, gdy napięcie wejściowe zasilania sieciowego jest niestabilne, dzięki regulacji napięcia nie będzie to miało negatywnego wpływu na napięcie zasilania podłączonych urządzeń. W przypadku zaniku zasilania lub zakłóceń częstotliwościowych zasilanie dostarczane będzie z baterii. Zasilacz awaryjny UPS typu online z podwójną konwersją chroni podłączone do niego urządzenia przed wpływem niskiej jakości zasilania sieciowego poprzez zasilanie ich w trybie ciągłym z niezakłóconego źródła zasilania. W przypadku awarii zasilania zasilacz awaryjny UPS typu online również dostarcza zasilanie do podłączonych urządzeń z baterii. Biorąc pod uwagę sprawność, trzy typy systemów zasilaczy awaryjnych UPS można uszeregować następująco: UPS offline > UPS line-interactive > UPS online; jeżeli kryterium stanowi jakość dostarczanego do podłączonych urządzeń zasilania, sekwencja wygląda następująco: UPS online > UPS line-interactive > UPS offline .

Obecnie dostępne na rynku trójfazowe zasilacze awaryjne UPS to głównie zasilacze typu online. W związku z tym w dalszej części znajduje się wprowadzenie do podstawowych topologii trójfazowych systemów zasilaczy awaryjnych UPS tylko typu online. Główne komponenty w przypadku podstawowej topologii trójfazowego zasilacza awaryjnego UPS to: łącznik elektroniczny trybu obejścia – bypass (bypass STS), układ korekty współczynnika mocy (PFC), inwerter (INV), łącznik elektroniczny falownika (INV STS) oraz ładowarka. Wzajemne połączenie podzespołów ilustruje rys. 1. W standardowym trybie pracy zasilanie odbywa się głównie poprzez następującą ścieżkę: zasilanie sieciowe → obwód PFC → inwerter → urządzenia podłączone. Gwarantuje to wysoką jakość dostarczanego zasilania i jednoczesne ładowanie baterii. W przypadku awarii zasilania sieciowego

zasilacz awaryjny UPS przełączy się na zasilanie z baterii. Inwerter dokona konwersji napięcia stałego (DC) do czystego sinusoidalnego napięcia przemiennego (AC) i zasili podłączone urządzenia. Po przywrócenia zasilania sieciowego zasilacz awaryjny UPS ponownie będzie zasilany z sieci. W przypadku stwierdzenia nieprawidłowości w działaniu inwertera zasilacz awaryjny UPS zasilany będzie przez zasilanie sieciowe trybu obejścia (bypass). Dzięki takiemu trybowi pracy zasilacz awaryjny UPS jest stabilnym, bezprzerwowym źródłem zasilania do podłączonych urządzeń klienta i pomaga zapobiegać ogromnym stratom spowodowanym przez awarie zasilania sieciowego. Zasilacze awaryjne UPS działają głównie jako pomosty służące do konwersji energii elektrycznej między zasilaniem sieciowym a zasilanymi urządzeniami. Podczas konwersji prądu przemiennego na stały (AC/DC) i ponownie na prąd przemienny oczywiste jest wystąpienie strat mocy i energii elektrycznej. Mając na uwadze te fakty, wiele państw wydało odpowiednie rozporządzenia standaryzujące wydajność konwersji (sprawność) zasilaczy awaryjnych UPS. W następnej części przedstawiono przepisy międzynarodowe dotyczące sprawności zasilaczy awaryjnych UPS.



Rys. 1 Podstawowa topologia trójfazowego zasilacza awaryjnego UPS typu online

III. Przepisy międzynarodowe dotyczące sprawności zasilaczy awaryjnych UPS

Część ta omawia międzynarodowe regulacje związane ze sprawnością zasilaczy UPS. Dotyczą one Chin, Europy oraz normy Energy Star z USA. Rys. 2 Normy sprawności zasilaczy awaryjnych UPS wydane przez Chińskie Centrum Certyfikacji Jakości (CQC) w kwietniu 2011. Zgodnie z informacjami zawartymi w tabeli standardowa sprawność dużych systemów zasilaczy awaryjnych UPS typu online (o mocy powyżej 100 kVA) wynosi 92%.

Rys. 3 Normy sprawności zasilaczy awaryjnych UPS ustalone dla Europy w marcu 2011 roku. Analizując dane na rys. 3, można zauważyć, że oprócz przepisów odnoszących się do mocy, normy europejskie uwzględniają również poziom obciążenia. Na przykład, dla zasilacza awaryjnego UPS o mocy 200kVA wymagana sprawność przy obciążeniu 25% wynosi 90%, przy obciążeniu 50% – 92,5%, a przy obciążeniu 75% i 100% – 93,5%.

Rys. 4 przedstawia projekt norm sprawności zasilaczy awaryjnych UPS przygotowany przez US Energy Star. Są one podobne do chińskich norm CQC, klasyfikując zasilacze głównie na podstawie trybu pracy i mocy znamionowej. W normie Energy Star zasilacz VFD (Voltage Frequency Dependent (zależny od częstotliwości i napięcia) jest odpowiednikiem zasilacza offline, o którym mowa była powyżej, zasilacz VI (Voltage Independent – niezależny od napięcia) jest odpowiednikiem zasilacza line-interactive, a zasilacz VFI (Voltage Frequency Independent – niezależny od częstotliwości i napięcia) jest odpowiednikiem zasilacza online. Jako przykład weźmy zasilacz awaryjny UPS typu online o mocy 200 kVA. Zgodnie z normą Energy Star jego sprawność powinna być większa niż $0.0099 \times \ln(P) + 0.805$ czyli 92,58%.

W celu zapewnienia zgodności z wymogami międzynarodowych przepisów dotyczących sprawności zasilaczy awaryjnych UPS oraz oszczędności energii i ochrony środowiska, urządzenia te powinny być projektowane z myślą o optymalizacji topologii układów PFC, topologii inwertera i metod sterowania. Istotny jest również odpowiedni dobór półprzewodnikowych elementów mocy oraz elementów magnetycznych. Tylko

w ten sposób systemy zasilaczy awaryjnych UPS mogą zapewnić klientom wysoką sprawność. W kolejnej części niniejsze opracowanie zawiera analizę i porównanie kolejno: topologii układu PFC, topologii inwertera, metod sterowania zasilaczami awaryjnymi UPS, sposobów wyboru półprzewodnikowych elementów mocy i elementów magnetycznych oraz sposobu pracy i sterowania trybem ECO.

Mode	from 1-1-2011 to 31-12-2012			
	UPS range: • 10 – < 20 kVA	UPS range: • 20 – < 40 kVA	UPS range: • 40 – < 200 kVA	UPS range: • 200 kVA
Normal mode Minimum efficiency measured according to EN 62040-3 Annex AA				
25 % of nominal power	85,5%	85,5 %	87,8 %	89,8 %
50 % of nominal power	89,8 %	90,3 %	91,3 %	92,3 %
75 % of nominal power	91,3 %	91,8 %	92,5 %	93,3%
100 % of nominal power	91,5 %	92 %	92,5%	93,3 %
Mode	from 1-1-2013 to 31-12-2014			
	UPS range: • 10 – < 20 kVA	UPS range: • 20 – < 40 kVA	UPS range: • 40 – < 200 kVA	UPS range: • 200 kVA
Normal mode Minimum efficiency measured according to EN 62040-3 Annex AA				
25 % of nominal power	86,5%	87,5 %	89,0 %	90,0 %
50 % of nominal power	91,0 %	91,5 %	92,0 %	92,5 %
75 % of nominal power	92,0 %	92,5 %	93,0 %	93,5%
100 % of nominal power	92,0 %	92,5%	93,0%	93,5 %

Version 2.0
2011-03-16

Rys. 3 Europejskie normy sprawności zasilaczy awaryjnych UPS

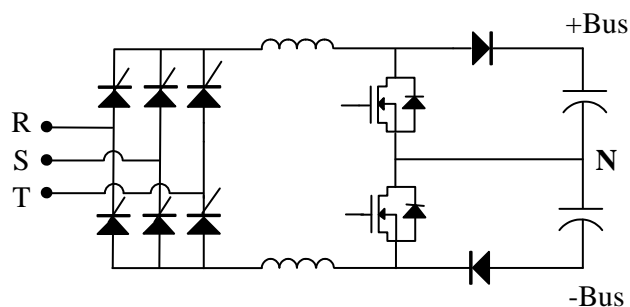
Minimum Average Efficiency Requirement ($Eff_{AVG MIN}$), Where: • P is the Output Power in watts (W), and • ln is the natural logarithm.				
UPS Class	Output Power	Input Dependency		
		VFD	VI	VFI
Consumer	$P \leq 1500 W$	0.97		
Commercial	$1500 W < P \leq 10,000 W$	0.97	0.96	$0.0099 \times \ln(P) + 0.805$
Data Center	$P > 10,000 W$	0.97	0.95	$0.0099 \times \ln(P) + 0.805$

Rys. 4 Topologia układów PFC

Układ PFC jest wykorzystywany głównie do zapewnienia stabilnego zasilania prądem stałym (DC), redukcji harmonicznym na wejściu zasilania sieciowego oraz ograniczenia strat mocy biernej. Istnieją różne typy topologii układów PFC wykorzystywanych w systemach zasilaczy awaryjnych UPS. Biorąc pod uwagę ich wpływ na sprawność, każda z nich posiada wady i zalety. Dlatego różne topologie odpowiednie są dla różnych zastosowań opisanych poniżej.

1. Trójfazowy, dwuprzelącznikowy, trójpoziomowy przekształtnik podwyższający napięcie (boost converter)

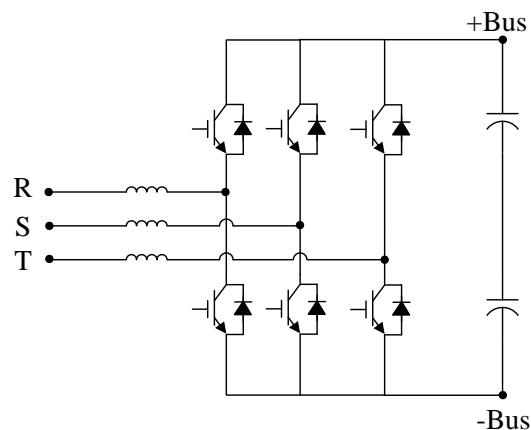
Schemat trójfazowego, dwuprzelącznikowego, trójpoziomowego przekształtnika podwyższającego napięcie pokazany jest na rys. 5. Trójfazowe napięcie wejściowe prostowane jest do stabilnego zasilania prądu stałego (DC) przy pomocy trójfazowego tyrystora (SCR), a następnie kolejno: induktora, tranzystora IGBT i diody. Z uwagi na wykorzystanie zaledwie dwóch tranzystorów IGBT topologia ta charakteryzuje się niskimi kosztami produkcji. Jednakże z tego samego powodu nie ma możliwości zwiększenia mocy. Wadą takiej topologii jest wysoki poziom zniekształceń harmonicznym prądu wejściowego. Zaletą tej topologii jest to, że zespół przelącznika pracuje na napięciu zasilania magistrali, co umożliwia wykorzystanie przelączników nieodpornych na wysokie napięcia. W rezultacie zwiększa to sprawność konwersji.



Rys. 5 Trójfazowy, dwuprzelącznikowy, trójpoziomowy przekształtnik podwyższający napięcie (boost converter)

2. Trójfazowy, sześcioprzełącznikowy przekształtnik podwyższający napięcie (boost converter)

Trójfazowy, sześcioprzełącznikowy przekształtnik podwyższający napięcie to często stosowana trójfazowa topologia PFC składająca się z sześciu aktywnych przełączników i trzech induktorów. Jej schemat prezentuje rys. 6. Jest to topologia odpowiednia dla zastosowań wymagających wysokiej mocy. Główną wadą trójfazowego, sześcioprzełącznikowego przekształtnika boost jest to, że jego przełączniki muszą być przystosowane do napięcia ponad dwukrotnie wyższego od napięcia magistrali. Powoduje to duży wzrost strat na przełączaniu. W rezultacie trójfazowe, sześcioprzełącznikowe przekształtniki boost mają zazwyczaj stosunkowo niską częstotliwość przełączania w celu redukcji strat przełączania.

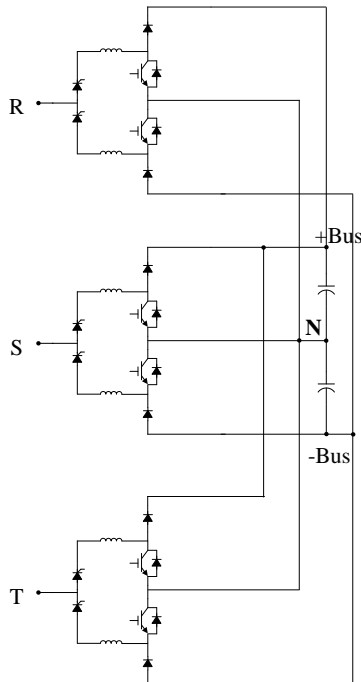


Rys. 6 Trójfazowy, sześcioprzełącznikowy przekształtnik podwyższający napięcie (boost converter)

3. Trójpoziomowy przekształtnik podwyższający napięcie (boost converter)

Schemat trójpoziomowego przekształtnika podwyższającego napięcie pokazany jest na rys. 7. Składa się on z sześciu przełączników, sześciu szybkich diod, sześciu wolnych diod i trzech induktorów. W topologii trójpoziomowej zespół przełącznika podłączony jest do zasilania

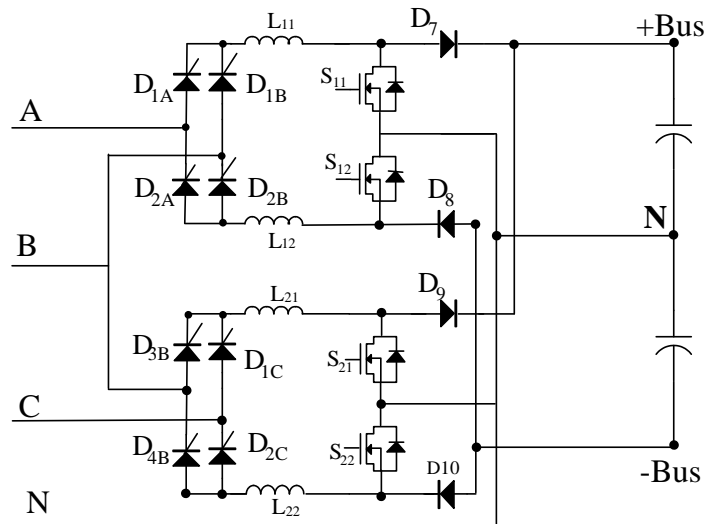
magistrali, co umożliwia wykorzystanie przełączników nieodpornych na wysokie napięcia, a to w rezultacie zwiększa sprawność konwersji.



Rys. 7 Trójfazowy przekształtnik podwyższający napięcie (boost converter)

4. Trójfazowy, czteroprzełącznikowy przekształtnik podwyższający napięcie (boost converter)

Zasada działania trójfazowego czteroprzełącznikowego przekształtnika podwyższającego napięcie jest taka sama, jak jego wersji trójfazowej. Przedstawia to rys. 8. Jest on często określany jako uproszczony trójfazowy przekształtnik podwyższający napięcie, z uwagi na możliwość uzyskania takiego samego efektu, jak w przypadku przekształtnika trójfazowego przy zastosowaniu tylko czterech przełączników. Dzięki temu jest on bardziej odpowiedni do zastosowań o dużej gęstości mocy. Trójfazowy, czteroprzełącznikowy przekształtnik podwyższający napięcie jest topologią opatentowaną przez firmę Delta Electronics. Dzięki jej zastosowaniu zasilacze awaryjne UPS firmy Delta mogą osiągnąć wysoką sprawność i gęstość mocy.



Rys. 8 Trójfazowy, czteroprzełącznikowy przekształtnik podwyższający napięcie (boost converter)

Tabela 1 porównuje wymienione powyżej cztery topologie obwodów PFC pod względem: zniekształceń harmonicznego prądu, sprawności, liczby elementów magnetycznych, kosztu elementów półprzewodnikowych i możliwości dwukierunkowego przepływu prądu.

Z tabeli tej wynika, że każda z tych topologii posiada zarówno zalety, jak i wady, a projektanci powinni dokonać wyboru odpowiedniej w zależności od zastosowania i pozycjonowania produktu.

Tabela 1 Porównanie topologii obwodów PFC

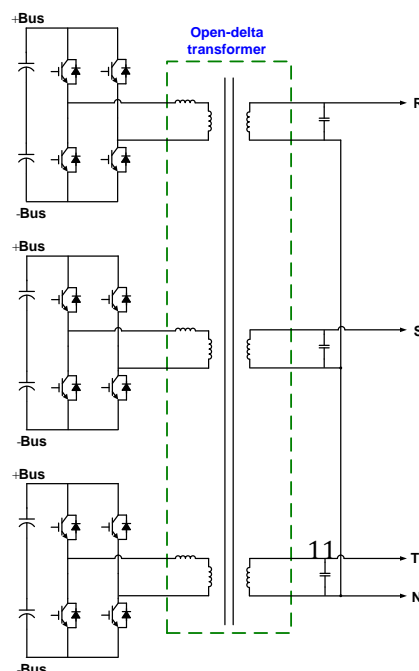
Topologia	Zniekształcenia harmonicznego prądu	Sprawność	Liczba elementów magnetycznych	Koszt elementów półprzewodnikowych	Dwukierunkowy przepływ prądu
Trójfazowy, dwuprzełącznikowy Trójpoziomowy przekształtnik podwyższający napięcie	Słaba	Wysoka	2	Niski	Nie

Trójfazowy, sześcioprzełącznikowy przekształtnik podwyższający napięcie	Dobra	Wysoka	3	Średni	Tak
rójpoziomowy przekształtnik podwyższający napięcie	Dobra	Stosunkow o wysoka	6	Wysoka	Nie
Trójfazowy, czteroprzełącznikowy przekształtnik podwyższający napięcie	Dobra	Stosunkow o wysoka	4	Średni	Nie

V. Topologia inwerterów

1. Trójfazowy, izolowany inwerter z pełnym mostkiem

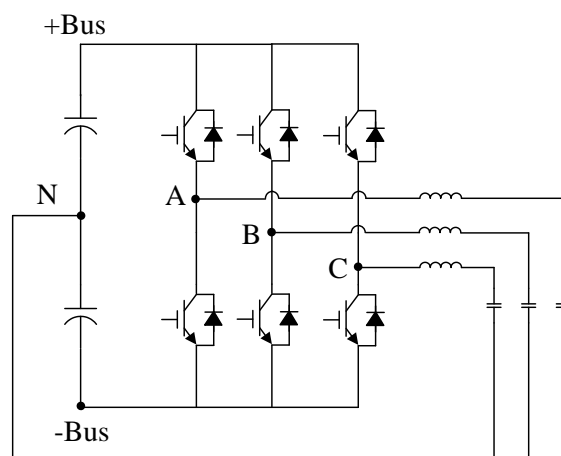
Schemat trójfazowego, izolowanego inwertera z pełnym mostkiem prezentuje rys. 9. Topologia ta posiada stosunkowo niskie napięcie magistrali, a podniesienie napięcia i zasilanie linii neutralnej w celu zasilania podłączonych urządzeń generowane jest przez izolowany transformator wyjściowy. Z uwagi na fakt, że izolowany transformator wyjściowy posiada zarówno duże rozmiary i wagę, jak i bardzo wysokie straty mocy, sprawność trójfazowego, izolowanego inwertera z pełnym mostkiem jest stosunkowo niska.



Rys. 9. Trójfazowy, izolowany inwerter z pełnym mostkiem

2. Trójfazowy inwerter dwupoziomowy

Schemat trójfazowego inwertera dwupoziomowego prezentuje rys. 10. Jego główną wadą jest to, że jego przełączniki muszą być przystosowane do napięcia ponad dwukrotnie wyższego od napięcia magistrali. Ogranicza to częstotliwość przełączania. Oznacza to, że w przypadku topologii dwupoziomowej, wybór częstotliwości przełączania oraz modyfikacja algorytmu sterowania w celu zwiększenia sprawności konwersji stanowią główne zagadnienia, z jakimi muszą zmierzyć się projektanci.

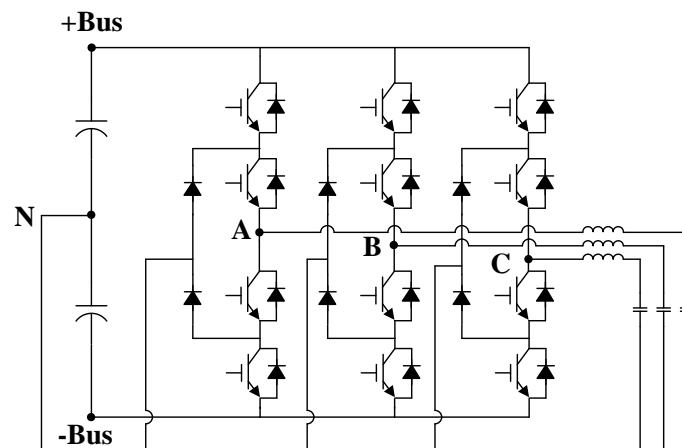


Rys. 10 Trójfazowy inwerter dwupoziomowy

3. Trójfazowy inwerter trójpoziomowy

Schemat trójfazowego inwertera trójpoziomowego prezentuje rys. 11. Podobnie do trójpoziomowego przekształtnika podwyższającego napięcie, jego zespół przełącznikowy musi obsługiwać jedynie napięcie magistrali.

Oznacza to, że posiada on wysoką sprawność. Mimo że topologia trójfazowego inwertera trójpoziomowego wymaga wielu zespołów przełączników, dzięki trzem poziomom posiada zalety niskiego poziomu tętnienia prądu indukcyjnych, niskiego napięcia krzyżowego zespołów przełączników oraz niskich strat mocy. Dzięki tym własnościom jest to często spotykana topologia w zasilaczach awaryjnych UPS charakteryzujących się wysoką sprawnością.



Rys. 11 Trójfazowy inwerter trójpoziomowy

Tabela 2 porównuje wymienione powyżej trzy topologie inwerterów pod względem: zniekształceń harmonicznym napięcia wyjściowego, sprawności, liczby elementów magnetycznych, kosztu elementów półprzewodnikowych i możliwości dwukierunkowego przepływu prądu. Obecnie dominującym rozwiązaniem jest wykorzystywanie topologii nie posiadających transformatorów.

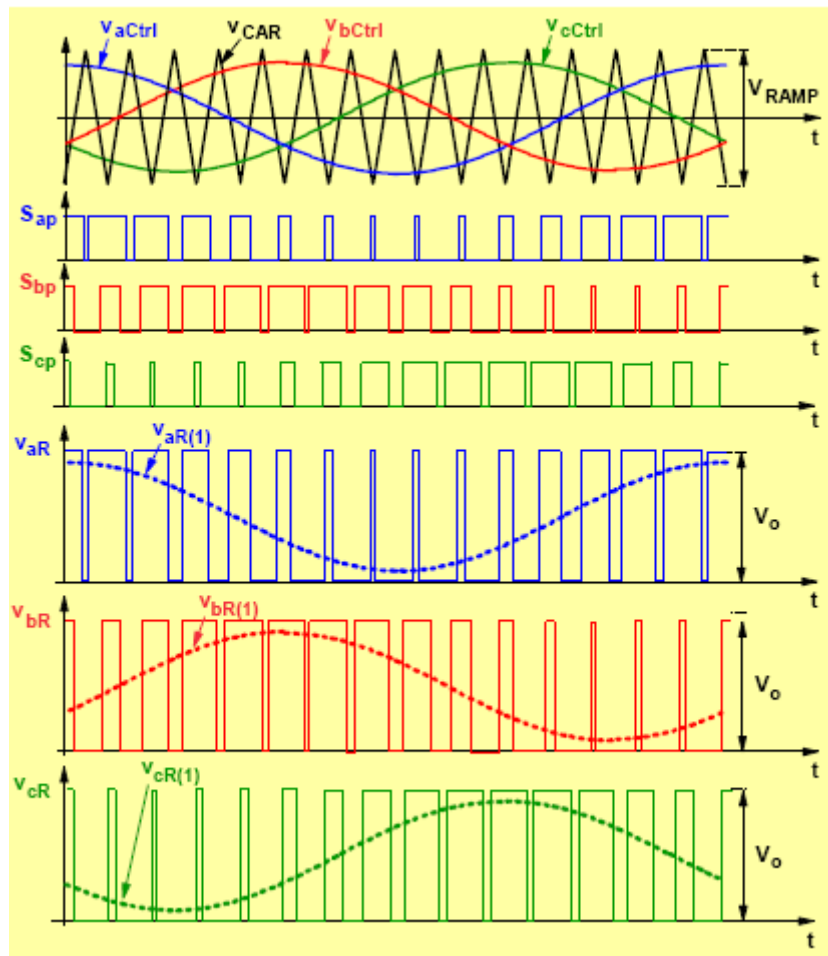
Tabela 2 Porównanie topologii inwerterów

Topologia	Zniekształcenia harmoniczne napięcia	Sprawność	Liczba elementów w magnetycznych	Koszt elementów półprzewodnikowych	Dwukierunkowy przepływ prądu
Trójfazowy inwerter dwupoziomowy	Dobra	Wysoka	3	Niski	Tak
Trójfazowy inwerter trójpoziomowy	Dobra	Najwyższa	3	Wysoka	Tak
Trójfazowy, izolowany inwerter z pełnym mostkiem	Dobra	Słaba	3 (duża)	Wysoka	Tak

VI. Metody sterowania zasilaczami awaryjnymi UPS

Najczęściej stosowaną metodą sterowania zasilaczami awaryjnymi UPS w zakresie modulacji szerokości impulsu jest SPWM (sinusoidalna modulacja szerokości impulsu). Ilustruje ją rys. 12. Sygnał sterujący (V_{ctrl}) jest porównywany z falą trójkątną w celu wygenerowania sygnału PWM sterującego zespołem przełączników. Zastosowanie w falowniku metody SPWM oznacza wskaźnik wykorzystania wynoszący 0,866. Oznacza to, że przy napięciu magistrali wynoszącym 380-420 VAC system powinien mieć napięcie co najmniej 620V. Ponieważ ta metoda sterowania posiada niski stopień wykorzystania napięcia magistrali, niezbędne jest jej wysokie napięcie, co zwiększa straty spowodowane przełączaniem na zespole przełącznika.

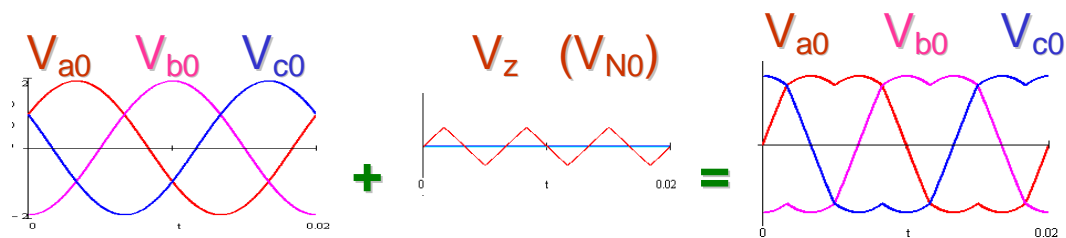
Jednocześnie, z powodu wysokiego napięcia magistrali, odpowiednio wzrośnie obciążenie napięciowe elementów przełącznika oraz wystąpi konieczność dodania obwodów tłumiących (snubber) celem absorbowania przepięć. Prowadzi to do zwiększenia strat mocy. Oznacza to, że zwiększenie wskaźnika wykorzystania napięcia magistrali, poprzez modyfikację metod sterowania spowoduje wzrost sprawności systemu.



Rys. 12 Trójfazowa metoda sterowania SPWM

Jak pokazano na rys. 13, do oryginalnego sygnału sterującego (V_{ctrl}) dodawana jest trzecia fala harmoniczna V_z . Nowy wygenerowany sygnał sterujący jest następnie porównywany z falą trójkątną w celu wygenerowania sygnału PWM sterującego zespołem przełączników. Dodanie nowej harmonicznej może skutecznie zwiększyć wskaźnik wykorzystania napięcia

magistrali z 0,866 do 1. Innymi słowy, wykorzystując metodę dodania nowej harmonicznej, system, który początkowo wymaga napięcia magistrali wynoszącego 620 V, będzie wymagał napięcia wynoszącego tylko 540 V. Jaki jest wpływ redukcji napięcia magistrali z 620V do 540 V na sprawność? W przypadku falownika o mocy 200 kW z częstotliwością przełączania 5 kHz straty przełączania na podzespołe przełącznika przy napięciu magistrali wynoszącym 540 V zmniejszą się o 250 W w porównaniu do systemu z napięciem magistrali wynoszącym 620 V.



Rys. 13 Trójfazowa metoda sterowania SPWM z dodatkową harmoniczną.

Jak widać na powyższym przykładzie, zmiana metod sterowania na bardziej efektywne zwiększa sprawność konwersji zasilacza awaryjnego UPS, co skutkuje zgodnością z większością norm dotyczących sprawności oraz oszczędnościami energii elektrycznej. Oprócz wyboru topologii i metody sterowania do kluczowych czynników wpływających na całościowe straty energii należą: wybór i projekt elementów mocy i elementów magnetycznych. Mogą one również mieć znaczący wpływ na sprawność. Szczegółowy opis znajduje się w kolejnej części.

VII. Wybór wyłącznika zasilania i komponentów magnetycznych

1. Wyłącznik zasilania

Często spotykane w systemach zasilaczy awaryjnych UPS włączniki mocy to tranzystory polowe z izolowaną bramką - MOSFET i tranzystory bipolarne z izolowaną bramką (IGBT). Te dwa typy komponentów różnią się zastosowaniem i tak: tranzystory MOSFET są wykorzystywane głównie w zastosowaniach, w których napięcie i prąd są stosunkowo niewielkie,

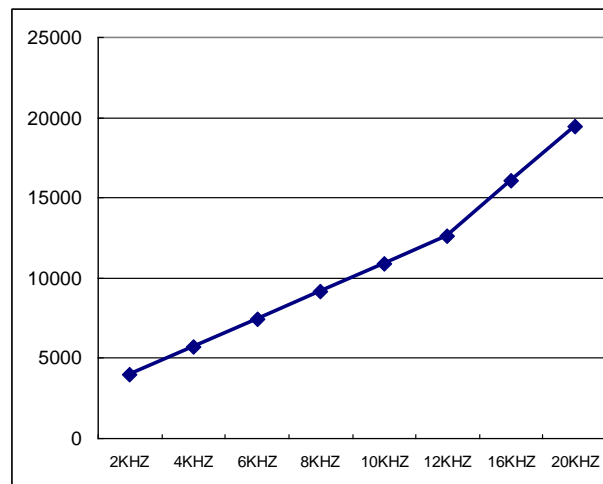
natomiast tranzystory IGBT są przeznaczone do zastosowań, gdzie napięcie i prąd są duże.

Najpopularniejszym obecnie tranzystorem MOSFET stosowanym w zasilaczach awaryjnych UPS jest CoolMOS. Charakteryzuje się on niskim współczynnikiem $R_{ds,on}$ i niskimi stratami przewodzenia, co umożliwia mu obsługę dużego natężenia prądu. Dlatego często stosowany jest on w systemach zasilaczy awaryjnych UPS o małej mocy (poniżej 20 kVA). Pomimo że tranzystor IGBT posiada słabsze parametry od tranzystora MOSFET, zarówno pod względem prędkości przełączania, jak i strat na przełączaniu, to ma on możliwość pracy przy większych mocach. Dlatego też tranzystory IGBT odgrywają bardzo ważną rolę w urządzeniach o dużej mocy.

Przykładowo porównajmy straty dla zasilacza awaryjnego UPS o mocy 200 kW wynikające z zastosowania tranzystorów IGBT. Dla porównania, układ PFC stosuje trójfazową, sześcioprzełącznikową topologię przekształtnika podnoszącego napięcie, natomiast układ inwertera stosuje topologię trójfazowego inwertera dwupoziomowego. Na tej podstawie dokonane zostanie porównanie strat na tranzystorze IGBT dla różnych częstotliwości przełączania i różnych napięciach magistrali oraz dla modułów tranzystorowych IGBT pochodzących od różnych dostawców.

Rys. 14 prezentuje porównanie strat na tranzystorze IGBT w zależności od częstotliwości przełączania. Z rysunku widać, że im wyższa częstotliwość przełączania, tym wyższa jest strata na tranzystorze IGBT. Strata na tranzystorze IGBT przy częstotliwości przełączania 2 kHz stanowi w przybliżeniu jedną piątą strat przy częstotliwości przełączania 20 kHz. Pomimo że straty przy zastosowaniu tranzystora IGBT przy niższych częstotliwościach przełączania są mniejsze, to wiąże się to z koniecznością zastosowania większego elementu magnetycznego, co prowadzi do większych strat na elemencie magnetycznym oraz niższej prędkości reakcji i niższej przepustowości. Wybór częstotliwości przełączania ma bezpośredni wpływ na sprawność zasilacza awaryjnego UPS. Należy jednak pamiętać, że inne

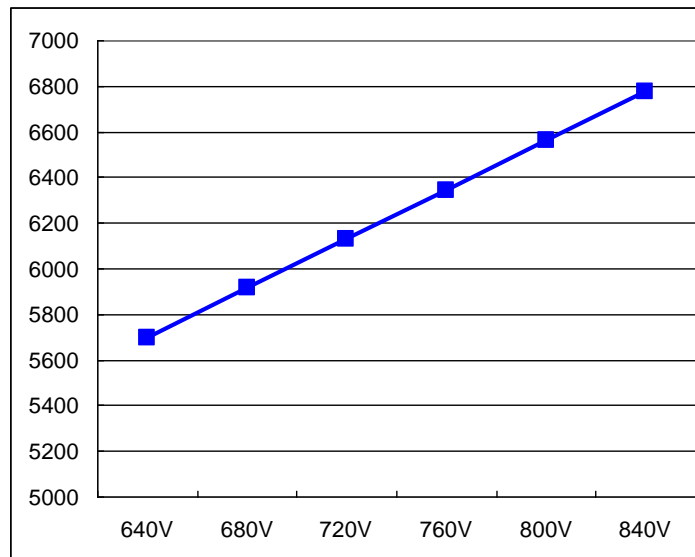
parametry powinny być również brane pod uwagę przy wybieraniu częstotliwości przełączania w celu zapewnienia wysokiej sprawności.



Rys. 14 Zależność strat na tranzystorze IGBT w zależności od częstotliwości przełączania.

(zasilacz UPS o mocy 200 kW; napięcie wejściowe / wyjściowe: 380/220 V;
napięcie magistrali: 800 V)

Rys. 15 prezentuje porównanie strat na tranzystorze IGBT w zależności od napięcia magistrali. Z rysunku widać, że im wyższe napięcie magistrali, tym wyższa jest strata na tranzystorze IGBT. Napięcie magistrali głównie wpływa na straty na przełączaniu tranzystora IGBT, ale ma również pewien wpływ na straty przewodnictwa. Z rysunku widać, że napięcie magistrali zasilacza awaryjnego UPS również ma znaczny wpływ na jego sprawność.



Rys. 15 Zależność strat na tranzystorze IGBT w zależności od napięcia magistrali.

(zasilacz UPS o mocy 200 kW; napięcie wejściowe / wyjściowe: 380/220 V; częstotliwość przełączania: 5 kHz)

Tabela 3 zawiera wyniki testów strat dla różnych modułów IGBT przy takich samych warunkach testowych. Można zauważyć, że różne moduły IGBT, nawet posiadając taką samą obudowę i ten sam rozmiar, mogą mieć różne straty mocy, a różnica ta może dochodzić nawet do 20%. Oznacza to, że w celu zwiększenia sprawności zasilaczy awaryjnych UPS należy również zwrócić szczególną uwagę na różnice w charakterystyce i prawidłowy dobór tranzystorów IGBT pochodzących od różnych dostawców.

Tabela 3 Wyniki testów strat na tranzystorach IGBT pochodzących od różnych dostawców

(zasilacz UPS o mocy 200 kW; napięcie wejściowe / wyjściowe: 380/220 V; częstotliwość przełączania: 5 kHz)

	A	B	C	D	E
Straty przewodnictwa na układzie PFC	1165	1290	1066	1020	1141
Straty układu PFC na przełączaniu	2208	2542	2391	2479	1948
Straty przewodnictwa na inwerterze	1087	1105	1017	1022	1165
Straty inwertera na przełączaniu	2133	2428	2294	2383	1857
Straty całkowite	6593	7365	6768	6904	6111

2. Elementy magnetyczne

Straty na elemencie magnetycznym również stanowią znaczną część strat zasilacza awaryjnego UPS. Głównymi czynnikami decydującymi przy wyborze elementu magnetycznego są częstotliwość przełączania i topologia. Projekty elementów magnetycznych zależą głównie od tętnienia prądu podczas przełączania, które zależne jest od topologii i częstotliwości przełączania. Na przykład, wartość indukcyjności wymagana przez trójfazowy falownik dwupoziomowy będzie większa niż ta dla trójfazowego falownika trójpoziomowego. Główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest większe napięcie trójfazowego induktora dwupoziomowego. Częstotliwość przełączania również bezpośrednio wpływa na tętnienie prądu induktora. Ogólna zasada mówi, że im wyższa częstotliwość przełączania, tym mniejsza wymagana jest wartość indukcji zespołu magnetycznego, a co za tym idzie mniejsze są straty zespołu magnetycznego.

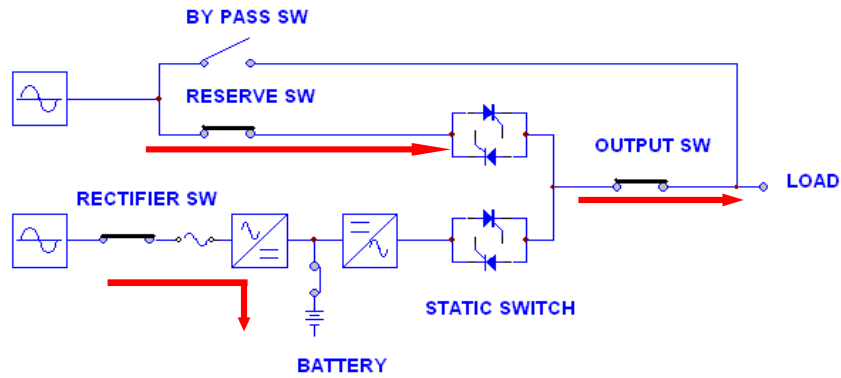
Oprócz częstotliwości przełączania i topologii, kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na straty na elemencie magnetycznym jest materiał z jakiego jest on wykonany. Najczęściej wykorzystywane do wykonania elementów magnetycznych materiały to m.in. arkusze stali krzemowej, stop

amorficzny, żelazowy rdzeń proszkowy, itp. Żelazne rdzenie wykonane z różnych materiałów mają swoje specyficzne zastosowania. Dlatego wybór odpowiedniego rodzaju materiału magnetycznego odgrywa ważną rolę z uwagi na jego wpływ na sprawność zasilacza awaryjnego UPS. Arkusze stali krzemowej są powszechnie wykorzystywane w systemach o niskiej częstotliwości przełączania. Wysoka częstotliwość przełączania zwiększyłaby znacznie straty żelazowe przy zastosowaniu stali krzemowej, obniżając znacznie w ten sposób sprawność zasilacza UPS. Stopy amorficzne oraz żelazowe rdzenie proszkowe są często stosowane w systemach UPS, głównie z powodu niskich strat na żelazie. Istnieją różne typy żelaznych rdzeni proszkowych, takie jak MPP, High Flux, Mage Flux i Sendust. Dlatego wybór żelazowego rdzenia proszkowego, odpowiedniego dla danego zastosowania, również ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia sprawności zasilacza awaryjnego UPS.

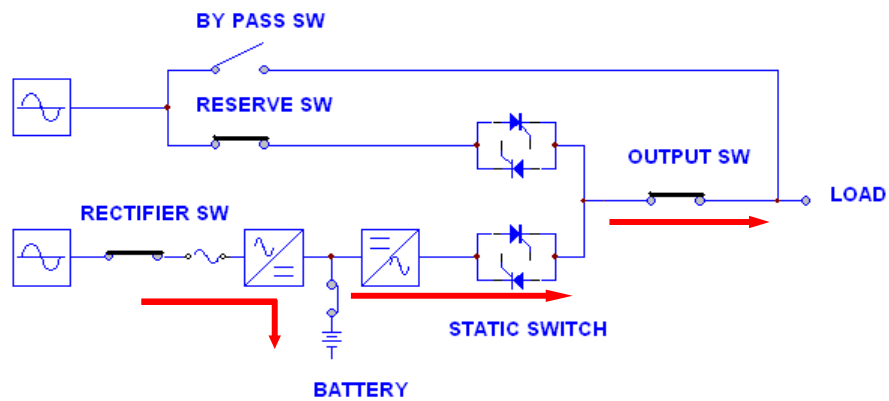
VIII. Tryb pracy ECO o wysokiej sprawności

Tryb ECO działa w następujący sposób: podczas poprawnych parametrów zasilania sieciowego podłączone urządzenia zasilane są bezpośrednio z sieci, a inwerter co do zasady nie jest obciążony; w przypadku zaniku zasilania sieciowego, podłączone urządzenia otrzymają zasilanie poprzez inwerter. Ilustrują to rys. 16 i 17. Główną zaletą trybu ECO jest wysoka oszczędność energii. Sprawność zasilacza awaryjnego UPS o podwójnej konwersji wynosi zazwyczaj około 92%~94%. Podczas pracy w trybie ECO jego sprawność wzrasta do ponad 98%. Główną wadą trybu ECO jest fakt, że w przypadku awarii zasilania sieciowego zasilacz potrzebuje czasu na przełączenie z trybu obejścia (bypass) na tryb inwertera. Ma to szczególne znaczenie, jeżeli podłączone urządzenia są typu indukcyjnego (np. transformator), ponieważ rozblokowanie fazy zasilania sieciowego i napięcia falownika podczas takiego przełączenia może powodować ryzyko niepowodzenia transferu i przerwy w zasilaniu. Opatentowana metoda

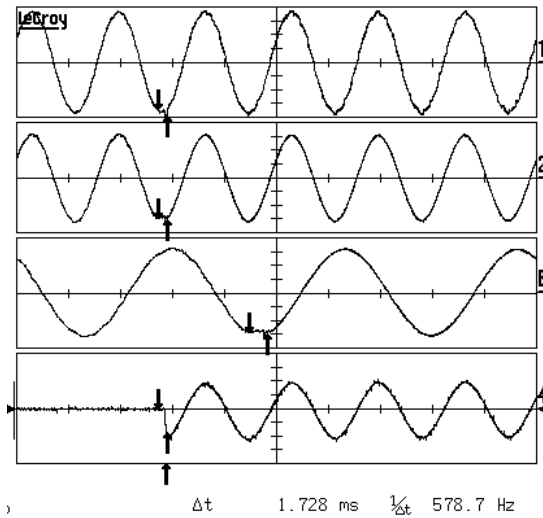
sterowania przejściem z trybu ECO firmy Delta Electronics wykorzystuje szybki mechanizm wykrywania i sterowania blokowaniem fazy, który w znacznym stopniu skraca czas przełączania i eliminuje ryzyko niepowodzenia transferu spowodowanego przez rozblokowanie. Ilustruje to rys. 18.



Rys. 16 Tryb ECO w przypadku poprawnego zasilania sieciowego



Rys. 17 Tryb ECO podczas awarii zasilania sieciowego



Warunki testu:

Tryb obejścia (bypass) → tryb falownika

CH1: Napięcie trybu obejścia (bypass) fazy L1
(100V/DIV)

CH2: Napięcie wyjściowe fazy L1 (100V/DIV)

CH3: Napięcie wyjściowe fazy L1 -

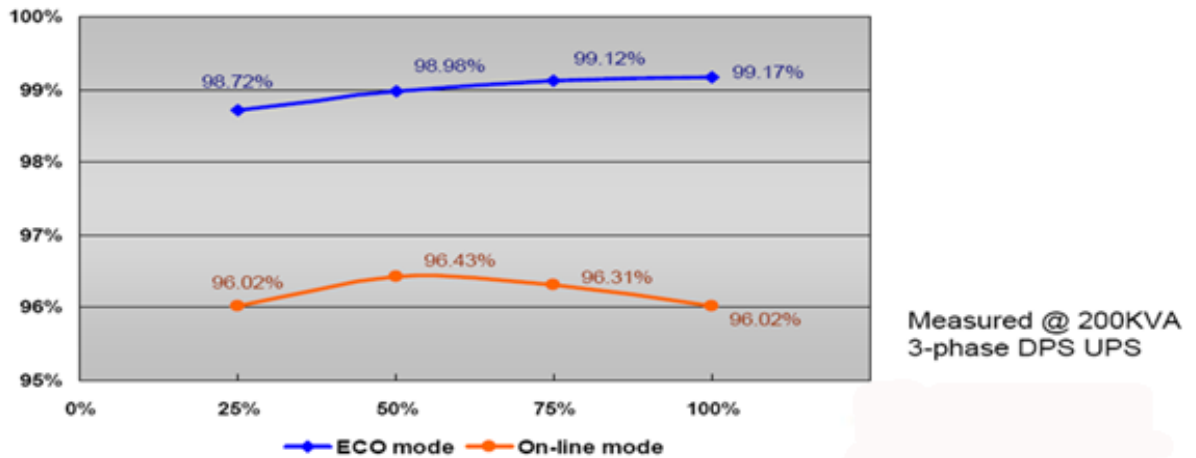
POWIĘKSZENIE (100V/DIV)

CH4: Prąd inwertera – faza L1 (100A/DIV)

Rys. 18 Krzywe fal dla przełączenia trybu ECO

IX. Wnioski

Niniejsze opracowanie skupia się na przedstawieniu topologii trójfazowych zasilaczy awaryjnych UPS oraz omawia sposoby zwiększenia sprawności konwersji poprzez optymalizację topologii układu, metod sterowania oraz zestawienia kluczowych elementów i zespołów. Trójfazowe zasilacze awaryjne UPS dużej mocy firmy Delta Electronics pomyślnie realizują cele wysokiej sprawności i spełniają wymagania dotyczące wysokiej wydajności dzięki wymienionym wyżej optymalizacjom topologii obwodów, metod sterowania oraz elementów i zespołów mocy. Rys. 19 przedstawia krzywe sprawności dla 200 kVA zasilacza awaryjnego UPS zmierzone przez urząd certyfikacyjny. Maksymalna sprawność tego modelu sięga 96,43% przy podwójnej konwersji zasilania (tryb online) i 99,17% w trybie ECO.



Rys. 19 Krzywe sprawności zasilacza awaryjnego firmy Delta Electronics

X. Bibliografia

1. Relationship between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis, IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 49, NO. 1, Luty 2002
2. High Performance Power Converter Systems for Nonlinear and Unbalanced Load/Source, Thesis , Virginia Tech, 1999
3. Analysis and Comparison of Space Vector Modulation Schemes for Three-leg and Four-leg Voltage Source Inverters, Virginia tech. thesis, 1997