

Nr 98/2017, 193–201
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

PRZEPISY I ZALECENIA BUDOWY WYBRANYCH URZĄDZEŃ ENERGOELEKTRONICZNYCH

RULES AND RECOMMENDATIONS FOR THE CONSTRUCTION OF SELECTED POWER ELECTRONIC DEVICES

Piotr Mysiak

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: p.mysiak@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule omówiono wybrane zagadnienia związane z projektowaniem wielopulsowych prostowników dużej mocy, wyposażonych w system sprzężonych elementów magnetycznych. Ponadto przeanalizowano problemy dotyczące konstrukcji elektromagnetycznych oraz zagadnienia związane z przepisami i zaleceniami dotyczącymi budowy urządzeń energoelektronicznych.

Słowa kluczowe: prostowniki diodowe, dławiki sprzężone, przekształtniki dużej mocy, kondycjonowanie energii elektrycznej.

Abstract: The article discusses selected issues related to the design of multipulse high power rectifiers, equipped with a system of coupled magnetic elements. Also analyzed issues concerning the design of electromagnetic structures and issues related to the rules and recommendations for the construction of power electronic devices.

Keywords: diode rectifiers, coupled reactors, high power converter, power conditioning.

1. WSTĘP

Projekt przekształtnika dużej mocy jest zadaniem kompleksowym [Barlik i Nowak 1998; Mysiak 2010]. Konieczne jest uwzględnienie wszystkich wymagań i założeń odnośnie do odbiornika, zasilania, warunków pracy samego urządzenia, ewentualnie możliwości realizacji sterowania [PN-IEC 146-1-1; PN-EN 61204; PN-IEC 146-1-1]. W szczególności należy zwrócić uwagę na:

- cechy nowości i spodziewane efekty (korzyści w stosunku do stanu obecnego, rozpoznanie tego stanu);
- podstawowe charakterystyki statyczne, dynamiczne (informacja od potencjalnego odbiorcy);
- warunki zasilania (sieć, baterie akumulatorów);

- oddziaływanie na sieć w zakresie EMC;
- bezpieczeństwo i komfort pracy;
- warunki konserwacji;
- warunki klimatyzacji (zakres temperatury pracy, wilgotność, wysokość n.p.m.);
- niezawodność (wymagania aplikacji) [Mysiak 2010; Mysiak i in. 2016].

Istota projektowania sprowadza się do analizy założeń, wymagań, rozwiązań możliwych i opłacalnych w realnym stanie techniki. Poszukuje się optimum według kryterium:

- koszty;
- niezawodność;
- waga, gabaryty.

Podstawowe zadania do rozwiązania można sformułować następująco:

- dobór elementów;
- dobór zabezpieczeń;
- projekt układu sterowania i monitoringu;
- projekt konstrukcyjny z uwzględnieniem warunków cieplnych i kompatybilności elektromagnetycznej.

W projektowaniu znajdują zastosowanie następujące metody inżynierskie:

- obliczanie analityczne na podstawie ogólnych wzorów;
- symulacje (dające rozwiązanie szczegółowe bez uogólniania);
- badania laboratoryjne.

Kompleksową realizację projektu można podzielić na cztery typowe fazy:

1. Formułowanie celu i założeń.
2. Projekt wstępny.
3. Projekt szczegółowy prototypu, budowa i badania.
4. Doskonalenie produktu w fazie serii prototypowej i w normalnej eksploatacji.

Najważniejszym kluczowym problemem, rozwiązywanym w trakcie projektowania, jest dobór elementów i podzespołów w taki sposób, aby temperatura w poszczególnych zespołach nie przekraczała dopuszczalnej, wynikającej z właściwości fizycznych materiałów, z których są zbudowane [Barlik i Nowak 1998; Wasiluk i in. 2007].

Niezawodność urządzenia jest również w dużym stopniu zależna od kształtowania się warunków termicznych. Ponieważ podstawową przyczyną nagrzewania się zespołów urządzenia są straty energii, oczywiste jest dążenie projektantów do poprawy sprawności. Minimalizacja strat stanowi również warunek zmniejszenia wymiarów zastosowanych urządzeń, aparatów i podzespołów.

2. KONSTRUKCJE ELEKTROMAGNETYCZNE

Znajomość parametrów i właściwości elementów tworzących przekształtnik oraz zasad działania układów przekształtnikowych, w połączeniu z informacjami doty-

czącymi funkcjonowania podzespołów i struktur sterowania oraz charakterystyk i właściwości obiektów zasilanych z przekształtników, stanowi warunek konieczny dla prawidłowego zaprojektowania i konstrukcji określonego urządzenia energoelektronicznego, należytej jego eksploatacji i sprawnego usuwania uszkodzeń. W celu stworzenia w pełni sprawnego i dobrze skonstruowanego aparatu czy urządzenia niezbędne jest uwzględnienie posiadanej wiedzy i umiejętności dotyczących technologii konstrukcji zarówno poszczególnych podzespołów, takich jak przekształtnik, układ sterowania lub obwody towarzyszące (zabezpieczenia, filtry), jak i przede wszystkim odpowiedniego połączenia tych podzespołów w całość, aby spełniły w rzeczywistych warunkach użytkowania dokładnie zaplanowaną funkcję. W każdym urządzeniu energoelektronicznym są dwa zasadnicze rodzaje obwodów: energetyczne i elektroniczne [Barlik i Nowak 1998; Mysiak i in. 2016].

Do obwodów energetycznych (głównych) oprócz szyn i przewodów łączących należy zaliczyć:

- odpowiednio połączony zestaw półprzewodnikowych przyrządów mocy, wyposażonych w zabezpieczenia przeciwzwarceniowe, przeciwprzepięciowe, odciążające i ewentualnie obwody komutacyjne;
- obwody wejściowe, zawierające transformator przekształtnikowy lub dławiki sieciowe, sprzężone elementy magnetyczne, aparaturę łączeniową (styczniki, wyłączniki), zabezpieczenia przeciwzwarceniowe i filtry przeciwzakłóceń;
- obwody pośredniczące o charakterze napięciowym (kondensatory) lub prądowym (dławiki);
- obwód wyjściowy, zawierający aparaturę łączeniową, filtry wyjściowe, bezpieczniki itp.

Do obwodów elektronicznych zalicza się obwody o małej mocy przeznaczone do sterowania, sygnalizacji, diagnostyki i pomiarów. W urządzeniach energoelektronicznych ważną funkcję pełni także system chłodzenia.

Konstrukcja urządzeń energoelektronicznych, której częścią jest również obudowa, stanowiąca jednocześnie zabezpieczenie mechaniczne poszczególnych podzespołów przekształtnika, zależy od jego typu, mocy, maksymalnych napięć i prądów, sposobu chłodzenia oraz przeznaczenia i przewidywanych warunków eksploatacji. W najczęściej stosowanych przemysłowych urządzeniach energoelektronicznych można wyróżnić następujące podstawowe rozwiązania konstrukcyjne:

- niezależną jednostkę w postaci wolno stojącej szafy lub kilku szaf, pulpitu, stojaka itp.;
- zwarty blok przeznaczony do zainstalowania w zbiorczej sterowni, rozdzielni, maszynie roboczej lub ścianie (małej i średniej mocy) [Wasiluk i in. 2007].

W przekształtnikach o mocach do ok. 100 kW wszystkie podzespoły są umieszczone w wspólnej obudowie. Przy większych mocach poszczególne podzespoły lub ich zestawy (w szczególności elementy magnetyczne) są umieszczone w oddzielnych obudowach (szafach) [Mysiak i in. 2016]. Rozmieszczenie

podzespołów oraz sposoby wykonania połączeń elektrycznych w ramach całej konstrukcji mają duży wpływ na właściwości urządzenia energoelektronicznego. Szczególnie ważne, ze względu na poprawność działania urządzenia energoelektronicznego, jest ekranowanie obwodów sterujących od energetycznych. Ważnym czynnikiem, który należy uwzględnić przy projektowaniu urządzenia, jest łatwość jego obsługi i serwisu. Umożliwiają to obwody sygnalizacji uszkodzeń i diagnostyki, dzięki którym szybko można zlokalizować miejsce i rodzaj uszkodzenia.

3. WYBRANE PRZEPISY I ZALECENIA DOTYCZĄCE BUDOWY URZĄDZEŃ ENERGOELEKTRONICZNYCH

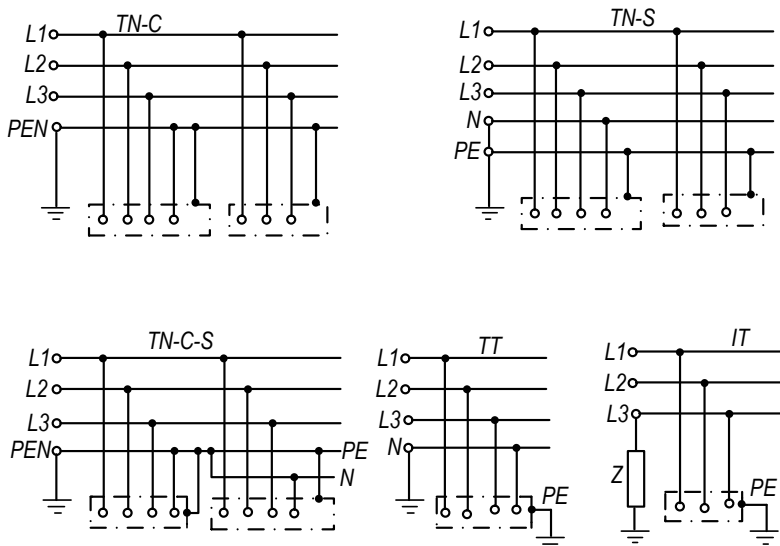
Przepisy i zalecenia dotyczące budowy urządzeń energoelektronicznych, zwłaszcza w zakresie ochrony przeciwporażeniowej, koordynacji izolacji i stopnia ochrony obudów, wynikają z ogólnych norm odnoszących się do większości urządzeń elektrycznych [PN-IEC 60364-5-51; PN-IEC 60364-5-53; PN-IEC 664-1]. Każde urządzenie elektryczne musi być tak wykonane i zainstalowane, aby podczas eksploatacji zarówno w stanie normalnej pracy, jak i w stanach awaryjnych na dostępnych dla obsługi elementach i częściach tego urządzenia nie wystąpiło napięcie, które mogłoby stanowić jakiegokolwiek zagrożenie porażeniowe. W przypadku urządzeń energoelektronicznych dotyczy to obudowy przekształtnika (konstrukcji szafy) i układu obciążenia zasilanego z tego urządzenia. Za niebezpieczne są uznawane napięcia przemiennie o wartościach skutecznych wyższych niż 25 V i napięcia stałe przekraczające 60 V.

Zgodnie z ogólnymi zasadami ochrony przed porażeniami w urządzeniach energoelektronicznych stosuje się ochronę podstawową, ochronę przy uszkodzeniu oraz ochronę równoczesną, czyli środek ochrony wzmocnionej [PN-IEC 60364-5-51; PN-IEC 664-1]. Do szczególnych wymagań odnoszących się do urządzeń energoelektronicznych należy zaliczyć konieczność umieszczenia części przewodzących prąd w obudowie o stopniu ochrony nie niższym niż IP20. Drzwi obudowy powinny być zamykane na klucz i wyposażone w wyłączniki wyłączające przekształtnik z sieci po ich otwarciu.

Środki ochrony pośredniej (dodatkowej) muszą spełniać swoje zadanie w razie uszkodzenia izolacji roboczej i w razie pojawienia się napięcia na osłonach urządzenia. Ich działanie polega albo na szybkim samoczynnym wyłączeniu urządzenia, albo na obniżeniu napięcia dotykowego na dostępnych przewodzących częściach urządzenia do wartości niestwarzającej zagrożenia porażeniowego. Obowiązująca norma [PN-IEC 60364-5-51], jako zasadniczy środek ochrony dodatkowej zaleca szybkie wyłączenie napięcia dotyku, zastępujące dotychczas stosowane zerowanie i uziemienie.

Spełnienie wymogu ochrony przed tzw. dotykiem pośrednim w odniesieniu do urządzeń energoelektronicznych wiąże się ze stosowaniem szybkich wyłączników prądu doziemienia, wyłączników przeciwporażeniowych, różnicowo-prądowych, miejscowych połączeń wyrównawczych i dodatkowej izolacji uzupełniającej izolację roboczą. Obudowy, których elementy są odseparowane podwójną izolacją galwaniczną od części przekształtnika przewodzących prąd, nie wymagają stosowania dodatkowych środków ochrony przed porażeniami.

Sposoby wykonania połączeń obwodów przeciwporażeniowych w urządzeniach energoelektronicznych zależą od typu linii zasilającej, do której jest połączone to urządzenie. Najczęściej urządzenia energoelektroniczne są zasilane z sieci trójfazowych cztero- i pięcioprzewodowych typu: TT, TN-C, TN-S i TN-C-S, których uproszczone schematy pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Rodzaje sieci elektroenergetycznych: L1,L2,L3 – przewody fazowe, N – przewód neutralny, PE – przewód ochronny, PEN – przewód ochronno-neutralny, Z – impedancja (linią przerywaną oznaczono dostępne części przewodzące)

Fig. 1. The types of power grids: L1 , L2 , L3 – phase conductors , N – neutral, PE – protective conductor, the PEN – conductor protective - neutral, Z – impedance (the dotted line indicates accessible conductive parts)

Do ochrony przed porażeniami wykorzystuje się przewody PE lub PEN o przekrojach nie mniejszych niż 4 mm^2 Cu. Łączy się je z szynami ochronnymi, znajdującymi się wewnątrz zamkniętych obwodów urządzeń energoelektronicznych. Szyny ochronne urządzeń energoelektronicznych pełnią funkcję zacisku ochronnego. Najczęściej wykonane są z płaskownika miedzianego (np. o przekroju $2 \times 20 \text{ mm}$ i długości 1000 mm) i oznaczone symbolem PE. Do szyn tych przyłącza się

oddzielnie obudowę urządzenia, metalowe obudowy wszystkich przyrządów i aparatów zainstalowanych w szafie przekształtnika, radiatory bloków elektroizolowanych, drzwi szafy, pulpit sterujący, obudowę maszyn roboczych lub innego odbiornika zasilanego z przekształtnika oraz metalowe elementy konstrukcji budynku i instalacji centralnego ogrzewania, a także instalacji wodnej, znajdującej się w pobliżu przekształtnika.

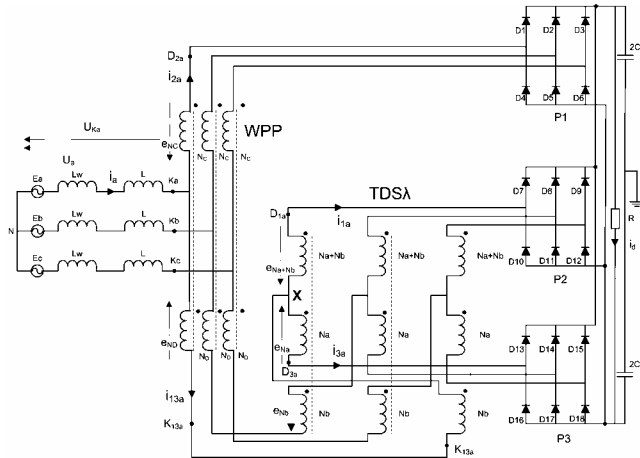
4. WARUNKI EKSPLOATACJI I KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ URZĄDZEŃ

Gwarantowane przez wytwórcę poprawne działanie urządzenia energoelektronicznego jest możliwe przy spełnieniu odpowiednich warunków. Dotyczą one przede wszystkim środowiska, w którym to urządzenie ma pracować, jakości linii zasilającej oraz poziomu zakłóceń elektromagnetycznych, oddziaływających na przekształtnik. Jednocześnie urządzenie energoelektroniczne nie powinno być uciążliwe w eksploatacji, a w szczególności nie powinno wpływać ujemnie na pracę innych urządzeń technicznych, przede wszystkim elektrycznych.

Wzajemne dopasowanie urządzenia energoelektronicznego do warunków środowiskowych i technicznych jest nazywane kompatybilnością. Rozróżnia się przy tym kompatybilność środowiskową (techniczno-klimatyczną), kompatybilność z linią zasilającą i kompatybilność elektromagnetyczną. Prawidłowo zaprojektowane urządzenie powinno spełniać wszystkie wymagania kompatybilnościowe w wymienionym zakresie [PN-IEC 146-1-1; PN-EN 61204; PN-IEC 60364-5-51; PN-IEC 146-1-3].

5. PRZYKŁADOWY SYSTEM ZASILANIA AC/DC

Niesterowane prostowniki diodowe, konstruowane zgodnie z powyżej przedstawionymi zaleceniami, są powszechnie używane ze względu na ich niewielki koszt, dużą niezawodność i niski poziom emisji zaburzeń elektromagnetycznych. W literaturze przedmiotu [Mysiak 2010; Mysiak i in. 2016] prezentowany jest 18-pulsowy prostownik diodowy z dławikami sprzężonymi, który umożliwia redukcję niepożądanych harmonicznych w prądach zasilania. Jego zaletą, w porównaniu do prostownika 18-pulsowego z transformatorem lub autotransformatorem [Wasiluk i in. 2007], jest znacznie mniejsza moc gabarytowa wymaganych elementów elektromagnetycznych, co skutkuje mniejszymi wymiarami i ciężarem całego prostownika.



Rys. 2. Schemat układu diodowego prostownika 18-pulsowego z elementami magnetycznie sprzężonymi

Fig. 2. Supply system based on the 18-pulse diode rectifier with coupled three-phase reactors

Na rysunku 2 przedstawiono schemat ideowy prototypowego układu diodowego prostownika 18-pulsowego o mocy 150 kVA z elementami magnetycznie sprzężonymi. Trójfazowe napięcie zasilające jest reprezentowane przez napięcie źródłowe U_a i indukcyjność sieci L_w . Dławiki sieciowe o indukcyjności L służą do redukcji harmonicznego prądu sieci podczas autonomicznej pracy prostownika 18-pulsowego. Zawsze możliwa jest praca tegoż prostownika 18-pulsowego również bez tych dławików.

Zasada działania prostownika 18-pulsowego polega na wytworzeniu trzech trójfazowych systemów napięć, przesuniętych względem siebie o 20° i zasilających 6-pulsowe prostowniki diodowe. Wzajemne przesunięcie systemów trójfazowych realizowane jest poprzez dławik wstępnego podziału prądu WPP i zestaw trójfazowych dławików sprzężonych TDSA [Mysiak 2010; Mysiak i in. 2016]. Taka konstrukcja prostownika umożliwi radykalne ograniczenie wyższych harmonicznego prądu zasilania, głównie rzędów 5, 7, 11 i 13. Podłączenie dławików sieciowych do prostownika znacznie zmniejszy zniekształcenia harmoniczne i asymetrię prądu sieci, zwłaszcza w warunkach znamionowego obciążenia.

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony system zasilania AC/DC średniej mocy, na tle skróconej systematyki zasad budowy urządzeń energoelektronicznych, jest dobrym przykładem układu elektrycznego, przy którego konstrukcji należało zwrócić szczególną uwagę

na stosowanie odpowiednich norm, zaleceń i przepisów, stanowiących podstawę budowy bezpiecznego, prawidłowo działającego i minimalnie wpływającego na środowisko urządzenia. Jak w każdej dziedzinie techniki, również w rozwijającej się dynamicznie elektrotechnice stosowanie różnego rodzaju norm warunkuje spełnienie wyżej wymienionych wymagań. W związku z tym elektryka była w Polsce jedną z najwcześniej normalizowanych dziedzin techniki [www.pkn.pl/elektrotechnika]. W roku 1923 został utworzony Polski Komitet Elektrotechniki, w ramach Stowarzyszenia Elektryków Polskich (SEP). W tym samym roku Polski Komitet Elektrotechniki został członkiem Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej IEC. Dopiero w rok później, w roku 1924, powołano Polski Komitet Normalizacyjny. Elektryka zatem była dziedziną techniki obecną w normalizacji od samego początku istnienia PKN.

Do końca marca 2011 roku normalizacją w obszarze elektryki, częściowo elektroniki i elektrotechniki zajmował się SEL, czyli Sektor Elektryki. Dnia 1 kwietnia 2011 roku po wyodrębnieniu z Sektora Elektryki (SEL) tematyki dotyczącej elektrotechniki został powołany Sektor Elektrotechniki (SET), który prowadzi dziewięć Komitetów Technicznych.

W ostatnich latach wprowadzono w normalizacji polskiej bardzo poważne zmiany, polegające w szczególności na ścisłym powiązaniu normalizacji krajowej z normalizacją międzynarodową i europejską [Nartowski 2004]. Zmiany te są bezpośrednio związane z członkostwem Polski w Unii Europejskiej. Normalizacja stanowi szerokie działanie o skali światowej. Warunkuje ona rozwój gospodarczy i jest ściśle powiązana z postępem technicznym i jego upowszechnianiem. Włączenie normalizacji polskiej do europejskiego systemu normalizacji jest absolutną koniecznością. Wysiłek związany z tym włączeniem oraz zorganizowanie stałego doskonalenia polskiej normalizacji przyczyni się do prawidłowego rozwoju kraju.

LITERATURA

- Barlik, R., Nowak, M., 1998, *Poradnik inżyniera energoelektronika*, WNT, Warszawa.
- Mysiak, P., 2010, *Wielopulsowe prostowniki diodowe z dławikami blokującymi wyższe harmoniczne prądu*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- Mysiak, P., Śleszyński, W., Cichowski, A., Wyrzykowski, L., Kolan, P., 2016, *Experimental Test Results of the 150 kVA 18-Pulse Diode Rectifier with Series Active Power Filter*, CPE-POWERENG'2016, 6th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 10th International Conference on Compatibility and Power Electronics, Bydgoszcz, 29.06.–01.07.
- Nartowski, Z., *Normalizacja w elektryce*, 2004, Biuletyn Techniczny Oddziału Krakowskiego SEP, nr 24.
- PN-EN 61204, *Zespoły prostownikowe bezpieczne. Ogólne wymagania i badania*.
- PN-IEC 60364-5-53, *Aparatura łączeniowa i sterownicza*.
- PN-IEC 60364-5-51, *Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Postanowienia ogólne*.

PN-IEC 664-1, *Koordinacja izolacji w instalacjach niskiego napięcia z uwzględnieniem odstępów izolacyjnych powietrznych i powierzchniowych dla urządzeń.*

PN-IEC 146-1-1, *Przekształtniki półprzewodnikowe. Przekształtniki o komutacji sieciowej. Wymagania ogólne.*

PN-IEC 146-1-3 *Przekształtniki półprzewodnikowe. Transformatory i dławiki.*

PN-IEC 146-1-1 *Przekształtniki półprzewodnikowe z komutacją zewnętrzną. Ogólne wymagania i badania.*

Wasiluk, W., Kulczycki, J., Strzałka, J., Sutkowski, T. (red), 2007, *Poradnik inżyniera elektryka*, t. 1, 2, WNT, Warszawa.

www.pkn.pl/elektrotechnika.

Autor wyraża podziękowanie Panu Zbigniewowi Zakrzewskiemu z Instytutu Elektrotechniki w Warszawie za pomoc w realizacji niniejszej pracy.