

JAROSŁAW ŚWIDERSKI

ZWT M-3, Łódź

TRANSFORMATORY PROSTOWNIKOWE

Streszczenie: Ogólna charakterystyka najkorzystniejszych układów połączeń w transformatrach prostownikowych 6-cio fazowych. Specyfika pracy transformatora prostownikowego w urządzeniach z prostownikami rtęciowymi. Transformatory prostownikowe dla urządzeń z prostownikami półprzewodnikowymi.

1. Wstęp

Zadaniem transformatora prostownikowego jest zasilanie odbiorników prądu stałego z sieci prądu zmiennego za pośrednictwem prostownika lub grupy prostowników. Ta specjalna rola transformatora prostownikowego stwarza wyjątkowe warunki pracy dla jego obwodu elektromagnetycznego a przede wszystkim dla uzwojeń.

Zauważmy, że w okresie naszego powojennego 15-lecia zaznaczył się poważny wzrost zapotrzebowania na energię prądu stałego:

dla komunikacji miejskiej i kolejnictwa elektrycznego; dla trakcji dołowej w górnictwie; dla napędów walcowniczych i dla elektrolizy wielkiej w hutnictwie.

Przemysł krajowy produkuje obecnie wiele odmian transformatorów prostownikowych o mocach od ok. 50 kVA do 10 MVA.

2. Ogólna charakterystyka najkorzystniejszych układów połączeń w transformatorach prostownikowych 6-cio fazowych

Transformatory, bezpośrednio współpracujące z prostownikami rtęciowymi w prostowniczych urządzeniach energetycznych, budowane są najczęściej z uzwojeniami pierwotnymi trójfazowymi.

Należy rozróżnić:

a) układy jednokierunkowe - przy których każda faza uzwojenia wtórnego czynna jest tylko w granicach jednej i zawsze tej samej połowy każdego okresu;

b) układy dwukierunkowe - przy których każda faza uzwojenia wtórnego czynna jest w obu połówkach każdego okresu.

Układy dwukierunkowe mogą być stosowane tylko w zespołach z zaworami jednoanodowymi. Mają one dwie poważne zalety:

1) umożliwiają pełne wykorzystanie wtórnych uzwojeń transformatora,

2) ograniczają udział harmonicznych w napięciu wyprostowanym i w prądzie pierwotnym transformatora.

W urządzeniach prostownikowych krajowych ustaliły się układy jednokierunkowe. Podobnie jak w wielu innych krajach, korzystamy z układów prostowniczych sześciofazowych albo dwunastofazowych pozornych.

W jednym i drugim przypadku stosuje się transformatory z uzwojeniem wtórnym 6-cio fazowym.

Spośród wielu znanych układów 6-cio fazowych jednokierunkowych zaledwie kilka znalazło dotychczas powszechne zastosowanie. Większość wytwórni w świecie stosuje układ gwiazda/dwugwiazda z dławikiem wyrównawczym (rys. 1a). Układ ten należy do grupy układów jednokierunkowych wielokrotnych równoległych. Posiada on wiele zalet:

1) jest bardzo uniwersalny tzn. nadaje się zarówno dla trakcji lekkiej jak i ciężkiej, dla elektrolizy i do napędów walcowniczych - a więc dla dość szerokiego zakresu napięć wyprostowanych i zakresu mocy;

- 2) pozwala na dobre wykorzystanie zaworów, dzięki równoległej pracy dwóch anod;
- 3) jest stosunkowo prosty konstrukcyjnie;
- 4) z punktu widzenia ekonomicznego przedstawia znaczne korzyści.

Zgodnie z normą PN-55/E-06071 układ gwiazda/dwugwiazda z dławikiem uznany jest jako typowy dla krajowych zespołów prostownikowych. Cechą w pewnych warunkach ujemną tego układu jest stromy podskok napięcia w przedziale pomiędzy bardzo małym obciążeniem (od ok. 1% obciążenia znamionowego) a stanem jałowym. Przy stanie jałowym wzrost napięcia względem jego wartości, odpowiadającej obciążeniu ok. $0,01 I_n$, - wynosi ok. 16%. Jest to uzasadnione tym, że przy bardzo małych wartościach obciążenia zespołu prostownikowego przestaje działać dławik wyrównawczy. Dla podtrzymania pracy dławika wyrównawczego niezbędne jest zapewnienie mu prądu wzbudzającego (magnesującego) o częstotliwości $3f$. Do tego celu służą wzbudniki (potrajacze częstotliwości) typu transformatorowego lub dławikowego (2a, 2b). Wzbudnik dławikowy jest zarówno elektrycznie jak i ekonomicznie korzystniejszy. Przemysł transformatorowy krajowy zamierza w niedalekiej przyszłości stosować wzbudniki dławikowe do transformatorów prostownikowych trakcyjnych. W przypadku elektrolizy oraz napędów walcowniczych nie ma okresowej pracy zespołów prostownikowych pod bardzo małymi obciążeniami i z tej przyczyny wzbudniki stają się zbędne.

W przypadkach, kiedy urządzenie prostownicze składa się z większej liczby zespołów, łatwo jest uzyskać układ 12-o fazowy pozorny a nawet 24-o fazowy, wykorzystując zasadę przesunięć fazowych o 30° pomiędzy uzwojeniami pierwotnymi (gwiazda i trójkąt) oraz możliwość dodatkowych przesunięć fazowych o $2 \times 7,5^\circ$ za pośrednictwem wstępných autotransformatorów zasilających (rys.3).

Dla urządzeń prostowniczych wielkoprądowych buduje się transformatory o równoległych grupach uzwojeń wtórnych, co z punktu widzenia pewności ruchu jest korzystne.

Oprócz omówionego układu gwiazdowego z dławikiem wyrównawczym często spotykany jest układ 6-cio fazowy wiდეłkowy (1b). Układ ten jest mniej korzystny pod względem wykorzystania zaworów, ma jednak pewne zalety pod względem wytrzymałości dynamicznej uzwojeń. Z tej przy-

czynny niektóre wytwórnie zagraniczne (np. ASEA) chętnie stosują go dla napięć wtórnych rzędu 3 kV (kolejnictwo elektryczne).

Poza tymi dwoma najbardziej rozpowszechnionymi układami połączeń w ciągu ostatniego 20-lecia opracowano nowe 6-cio fazowe układy połączeń, którym przypisuje się poważne zalety eksploatacyjne. Tak np. firma "Oerlikon" propaguje układ potrójny dwufazowy (Gegentaktschaltung).

Układ potrójny - dwufazowy pod względem konstrukcyjnym jest dla transformatora nieco kłopotliwy (rys. 1c), daje jednak poważne korzyści eksploatacyjne przede wszystkim w urządzeniach prostowniczych wielkoprądowych: pozwala zwiększyć o ok. 20% stopień wykorzystania prostownika a tym samym zmniejszyć o ok. 10% spadek napięcia w łuku i wreszcie zmniejszyć prawie dwukrotnie wartość prądu przy zapłonie wstecznym w stosunku do wartości, charakteryzującej układ dwugwiazdowy z dławikiem. Układ dwugwiazdowy szeregowy, (rys. 1d) eliminuje niebezpieczeństwo zapłonów wstecznych dzięki szeregowemu łączeniu po dwie anody. Zalety układu szeregowego okazują się szczególnie cenne w klimacie gorącym, sprzyjającym powstawaniu częstych zapłonów wstecznych. Stosunkowo niedawno układ szeregowy był tematem eksperymentów w kolejnictwie radzieckim.

3. Specyfika pracy transformatora prostownikowego w urządzeniach z prostownikami rtęciowymi

Warunki pracy transformatora prostownikowego różnią się zasadniczo od warunków pracy zwykłego transformatora energetycznego, a mianowicie:

1) w napięciu wyprostowanym oraz w prądzie pierwotnym transformatora prostownikowego występują harmoniczne, których rząd określa się w zależności od liczby faz uzwojenia wtórnego:

$$h_1 = m \cdot n \pm 1 \qquad h_u = m \cdot n$$

h_1 - rząd harmonicznej w prądzie pierwotnym

h_u - " " w napięciu wyprostowanym

n - liczba faz uzwojenia wtórnego

m - kolejna liczba całkowita,

2) uzwojenia transformatora prostownikowego narażone są na skutki dynamiczne zapłonów wstecznych, znacznie groźniejsze aniżeli skutki zwarć sieciowych dla uzwojeń transformatorów energetycznych,

3) uzwojenia transformatora prostownikowego narażone są na przepięcia, wynikające ze stromości gaśnięcia łuku $\frac{di}{dt}$,

4) uzwojenia transformatora prostownikowego trakcyjnego narażone są na znaczne przeciążenia o dużej częstotliwości.

W dziedzinie produkcji transformatorów najpoważniejszymi i ciągle aktualnymi problemami konstrukcyjno-technologicznymi są: wytrzymałość udarowa napięciowa oraz wytrzymałość dynamiczna uzwojeń.

Wiadomo, że prostowniki rtęciowe wykazują po znaczniejszych przeciążeniach skłonności do zapłonów wstecznych i że prądy zwarcia, zjawisku temu towarzyszące, w najniekorzystniejszych warunkach mogą osiągać wartości chwilowe prawie dwukrotnie większe aniżeli w stanie zwykłego zwarcia uzwojenia wtórne. Stąd niebezpieczeństwo powstawania groźnych naprężeń mechanicznych w zwojach oraz w elementach izolacyjnych uzwojenia. Wyniki badań różnych wytwórni można streścić w następujących wskazówkach dla projektantów urządzeń prostowniczych:

1) zalecane stosowanie zaworów jednoanodowych pompowych, które pozwalają na zwiększenie obciążalności anod i wykazują b.małą częstość zapłonów wstecznych. Wg danych statystycznych firmy "Oerlikon" w istniejących urządzeniach prostowniczych wielkoprądowych częstość zapłonów wstecznych wynosi przeciętnie około 1 na 8 lat dla każdej anody,

2) stosowanie możliwie dużych napięć zwarcia w transformatorach prostownikowych,

3) stosowanie blokady siatkowej,

4) stosowanie szybkich wyłączników katodowych,

5) ograniczanie jednostkowej mocy transformatorów,

6) włączanie do przewodu zerowego dławników przeciwzwarciowych bezrdzeniowych.

Jest rzeczą niewątpliwą, że najistotniejszym osiągnięciem techniki prostownikowej jest b. duże ograniczenie częstości zapłonów wstecznych. Poza tym b. istotnym i ważnym dla wytrzymałości dynamicznej transformatora jest warunek szybkiego likwidowania zapłonu. Należy pamiętać, że dla wytrzymałości dynamicznej uzwojeń decydującym czynnikiem jest nie sama wartość siły F lecz jej impuls $F \cdot \Delta t$.

Nawet bardzo znaczne siły są mało groźne, jeśli ich czas działania jest dostatecznie krótki. Jeśli siła zwarciova F jest równoważona reakcją elementów uzwojenia R , wówczas pojawiające się impulsy działają tylko na zmęczenie materiału. Praktyka firm zagranicznych a częściowo i krajowa wykazują, że dobrze skonstruowane i wykonane uzwojenia nie są podatne na szybkie zmęczenie. Jeśli natomiast, wskutek złej mechanicznej jakości izolacji pionowej w uzwojeniach lub wskutek usterek technologii, siła F nie znajduje pełnego zrównoważenia, wówczas wypadkowa $P = F \cdot R$ zagraża całości uzwojenia tym bardziej, im impuls $P \cdot \Delta t$ jest większy.

Konstrukcją bardzo rozsądną i dobrze zabezpieczającą uzwojenia przed skutkami sił zwarciowych oraz częstych i znacznych przeciążeń jest sprężynowy docisk uzwojeń na kolumnie za pośrednictwem oddzielnych pierścieni stalowych (rys.4).

Konstrukcja ta jest już od bardzo wielu lat z powodzeniem stosowana przez firmy szwajcarskie "BBC" i "Oerlikon". Zarzuty stawiane jej przez przeciwników, chyba tylko w jednym punkcie są słuszne: że jest dość trudna i kosztowna. Pod względem celowości trzeba uznać jej wysokie walory.

Nasze teraźniejsze rozwiązania krajowe oparły się na zasadzie sztywnej blokady z zabezpieczeniem dodatkowym osiąganym przez lakierowanie uzwojeń.

Ten sposób dla napięć górnych do ok. 40 kV nie budzi zastrzeżeń. Dotychczasowe wnioski z eksploatacji oraz z wyników badań w zwarciowni są pomyślne.

Drugim ważnym, ale łatwiejszym do opanowania, problemem jest odporność elektryczna uzwojeń wtórnych na przepięcia, powodowane stromością zanikania prądu w łuku. Przepięcia te, o wartościach nieraz bardzo znacznych lecz bardzo krótkotrwałe, wywołują impulsy naprężeń stosunkowo mało groźne dla układu izolacyjnego.

4. Transformatory prostownikowe dla urządzeń z prostownikami półprzewodnikowymi

Urządzenia prostownikowe z prostownikami półprzewodnikowymi znajdują się jeszcze w okresie eksperymentowania.

Pierwsze tego rodzaju urządzenia, wykonane za granicą, znalazły zastosowanie dla niskich napięć wyprostowanych, nie przekraczających 600 V.

Ze względu na szczególną przydatność prostowników półprzewodnikowych dla elektrolizy, transformatory przeznaczone do ich zasilania są typu wieloprądowego. Uzwojenia wtórne składają się z wielu grup równoległych trójfazowych.

Układy mostkowe, a więc dwukierunkowe, umożliwiają pełne wykorzystanie uzwojeń wtórnych, co wpływa na ekonomiczność budowy tego typu transformatorów prostownikowych i zbliża je konstrukcyjnie do zwykłych transformatorów energetycznych. Rys.5 podaje jeden z układów, stosowanych dla urządzenia z prostownikami krzemowymi dla 350 V napięcia wyprostowanego i 20.000 A obciążenia znamionowego dla szyn zbiorczych prądu stałego.

5. Uwagi końcowe

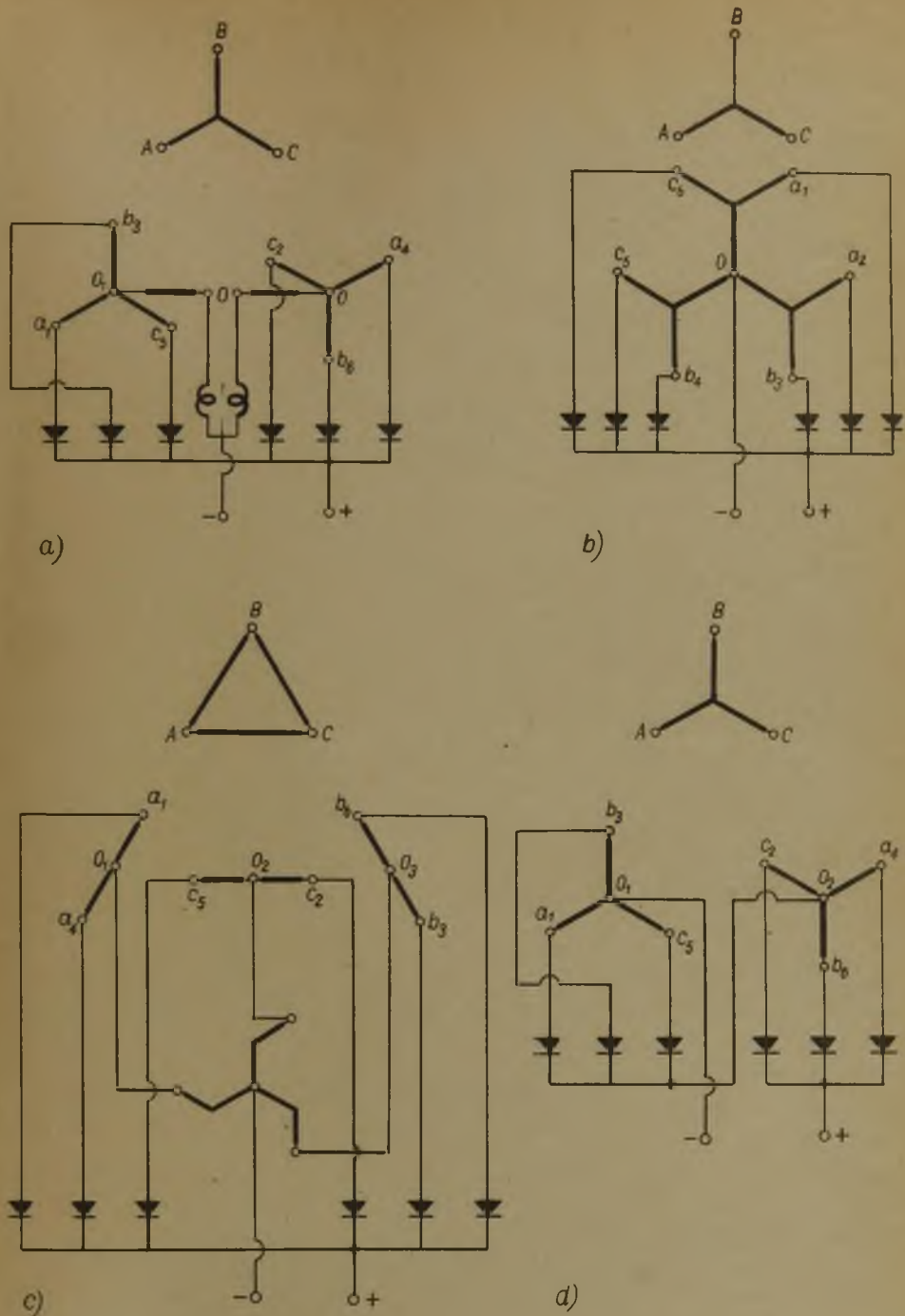
W związku z ciągle rosnącym u nas zapotrzebowaniem na urządzenia prostownicze zachodzi konieczność przystosowania krajowego przemysłu elektrotechnicznego do zaspokajania przede wszystkim potrzeb naszego kolejnictwa i hutnictwa w tej dziedzinie. Dotychczasowe doświadczenia wskazują na to, że ogólne perspektywy na przyszłość zarysowują się pomyślnie. Szczególnie duże nadzieje można wiązać z nowym Zakładem Aparatury Trakcyjnej, który wyrówna dotychczasowe najdotkliwsze braki w wyposażeniu krajowych urządzeń prostowniczych.

Трансформаторы для выпрямителей

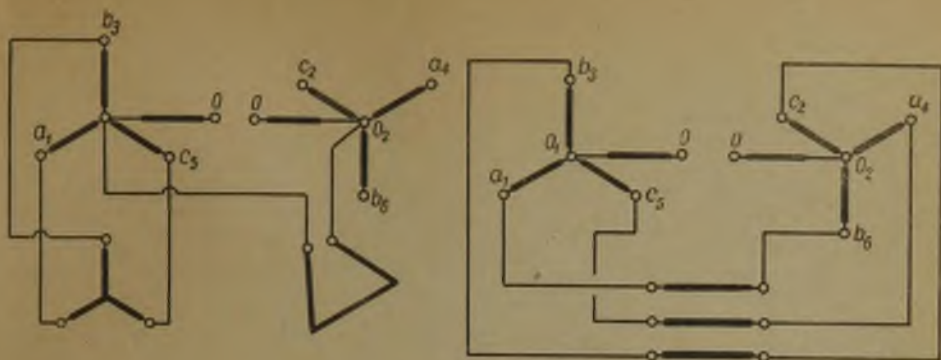
Автор дает сводку сведений о наиболее целесообразных схемах 6-фазных трансформаторов для выпрямителей. Дана характеристика работы трансформаторов для разных выпрямительных установок. Даны краткие сведения о работе трансформаторов с полупроводниковыми выпрямителями.

Les transformateurs pour les redresseurs

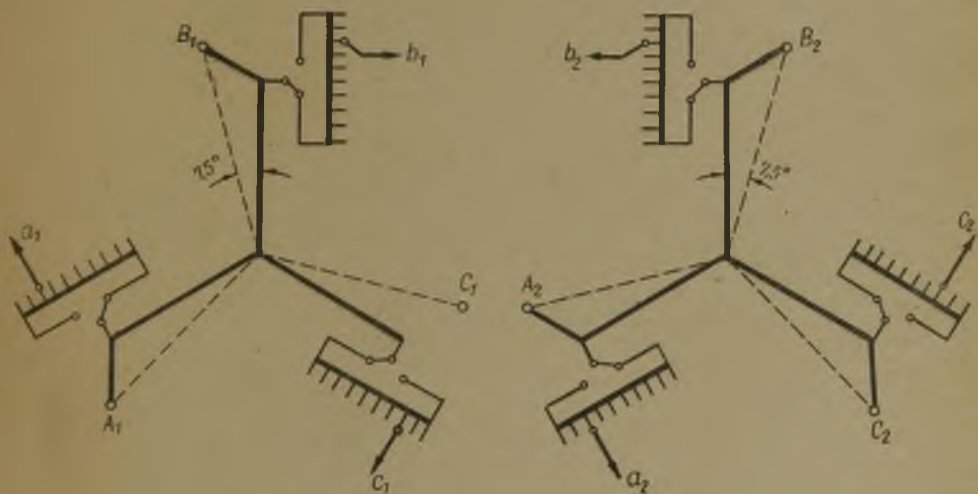
L'auteur donne un rappel succinct des schemas utilisés pour les transformateurs alimentants les redresseurs et caracterise leurs avantages et défauts. L'article donne une courte mention des installations avec des redresseurs á semiconducteurs.



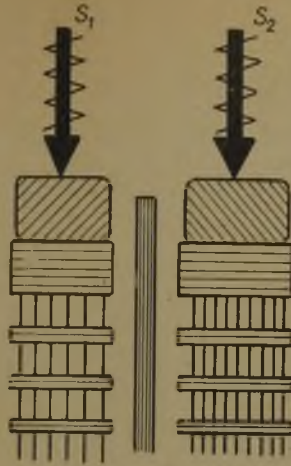
Rys.1. Zasadnicze układy prostownikowe 6-fazowe jednokierunkowe



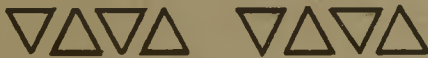
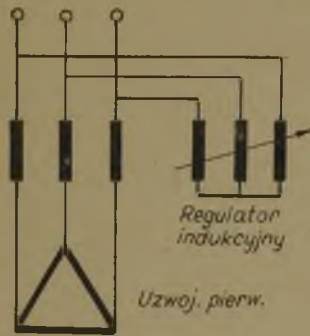
Rys.2. Wzbudniki (potrójacze częstotliwości)
 a - układ transformatorowy, b - układ dławikowy



Rys.3. Autotransformatorowy układ regulacyjny
 z przesunięciem fazowym o 15°



Rys.4. Urządzenie dociskowe sprężynowe dla uzwojeń transformatorowych



Grupy uzwojenia wtórnego

Rys.5. Schemat układu uzwojeń transformatora dla zespołu z prostownikami krzemowymi (dla elektrolizy)