

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA**

**Wydział Elektryczny**

Instytut Elektroenergetyki

Zakład Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej



## **INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA**

**E32/**

### **Energoelektroniczne elementy łączy prądu stałego (TCad)**

**dr inż. Piotr Biczal**

[www.ee.pw.edu.pl/~biczalp](http://www.ee.pw.edu.pl/~biczalp)

Ćwiczenie należy wykonywać po kolei, według instrukcji.

Należy zapoznać się z zagadnieniem przed przystąpieniem do ćwiczenia.

Ćwiczenie odbywa się w sali 405, klatka C GE.


## Pakiet symulacyjny TCad


Program TCad jest polskim programem do symulacji układów energoelektronicznych, szczególnie dużej mocy. Dzięki zastosowaniu prostych, ale dobrze dobranych algorytmów numerycznych oraz modeli elementów obwodu doskonale nadaje się do projektowania złożonych układów przekształtnikowych. Pod wieloma względami przewyższa zagraniczne pakiety tego typu.

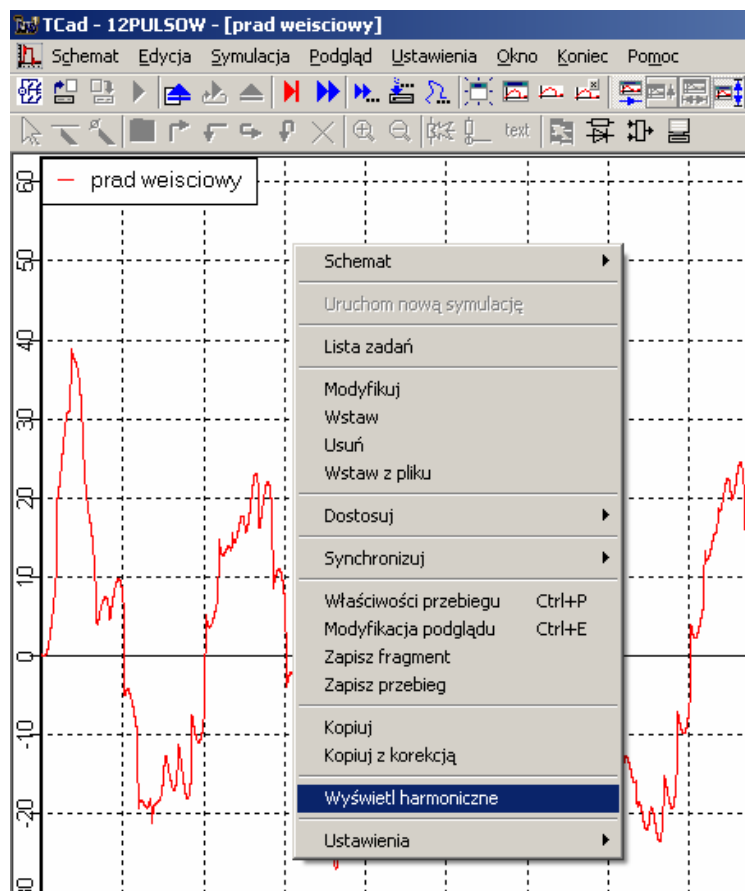
Opis TCad’a można znaleźć na stronie programu [www.tcad.com.pl](http://www.tcad.com.pl).

Tam też można pobrać wersję demo, co gorąco polecam. Program jest bardzo prosty w obsłudze. Do wykonania ćwiczenia wystarczy znajomość następujących funkcji:

- uruchomienie i zakończenie symulacji,
- analiza harmoniczných,
- zmiana parametru.

Aby uruchomić symulację należy kliknąć ikonę .

Po zakończeniu obliczeń ikona  będzie migać na czerwono i niebiesko. Jej naciśnięcie spowoduje zamknięcie symulacji i wszystkich przebiegów. Nie naciskać przed przeprowadzeniem wszystkich analiz.



Rys. 1. Menu kontekstowe TCad’a

## Ćwiczenie „Energoelektroniczne elementy łączy prądu stałego (TCad)”

Aby wykonać analizę harmonicznych należy w obszarze okna kliknąć prawym klawiszem myszy i wybrać funkcję „Wyświetl harmoniczne” (rys. 1). Otworzy się okno parametrów analizy, które należy odpowiednio wypełnić (wybrać 40 harmonicznych). Po przeprowadzeniu analizy otrzymane dane zapisać.

Aby zmienić parametry elementu należy go kliknąć dwukrotnie. Otworzy się okno dialogowe, w którym należy zmienić odpowiednie dane i kliknąć OK.

### Łącza prądu stałego

Łącze prądu stałego to odcinek linii, w której energia przekazywana jest prądem stałym. Linia prądu stałego po obu stronach zakończona jest urządzeniami do przetwarzania prądu zmiennego na prąd stały i odwrotnie. Uproszczony schemat blokowy takiego układu przedstawia rys. 2.

Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy łącza prądu stałego

Linie prądu stałego przeżywają dziś renesans. Dzieje się tak, ponieważ stało się możliwe budowanie przekształtników energoelektronicznych na moce rzędu megawatów i napięcia setek kilowoltów. W urządzeniach tych królują przekształtniki oparte na diodach, tyrystorach i tyrystorach GTO. Mimo podejmowanych prób wysokonapięciowe układy tranzystorowe wciąż nie dorównują parametrami, niezawodnością, ceną i wielkością układom tyrystorowym [5]. Szczegółowy opis rozwiązań wysoko napięciowych linii prądu stałego można znaleźć w [2].

Oprócz przesyłu kablami po dnie morza na znaczne odległości, linie prądu stałego mają za zadanie łączyć systemy energetyczne, w których stosuje się napięcia o różnych parametrach, a w szczególności o różnej częstotliwości. Obwód prądu stałego uniezależnia wtedy przesył energii od warunków napięciowo-częstotliwościowych w obu łączonych systemach. Możliwym się staje np. przekazywanie energii z sieci 60 Hz do sieci 50 Hz.

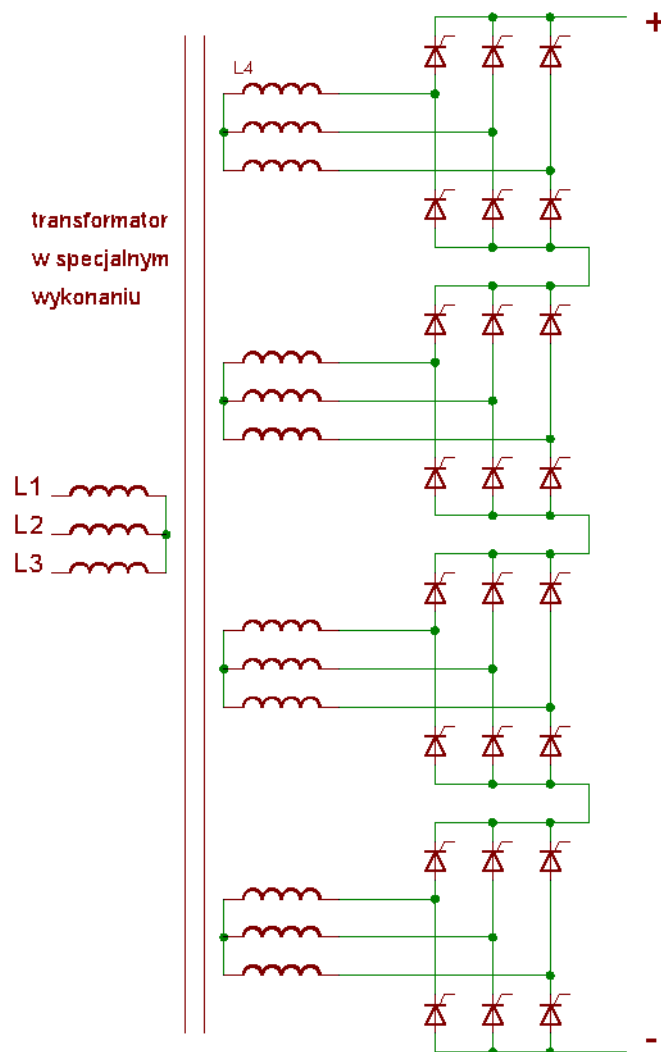
Łącza prądu stałego znajdują również zastosowanie w dynamicznie rozwijającej się energetyce wiatrowej. Pozwalają one na znaczną poprawę efektywności elektrowni wiatrowych dzięki zastosowaniu generatorów zmiennie obrotowych. Przykładem wiodącym są tu elektrownie Enercon [3]. Również łącza te planuje się wykorzystywać do przesyłu energii z farm wiatrowych budowanych w morzu.

Oprócz wspomnianych wyżej zastosowań, podobną strukturę wykorzystuje się w zasobnikach energii oraz do przyłączania mikrosieci zawierających znaczny udział odnawialnych, niestabilnych źródeł energii. Chociaż znacznie niższe napięcia pozwalają na stosowanie tu

przekształtników tranzystorowych, to jednak w warunkach krajowych, w zakresie napięć powyżej 6 kV bardziej opłacalne okazuje się budowanie układów tyrystorowych.

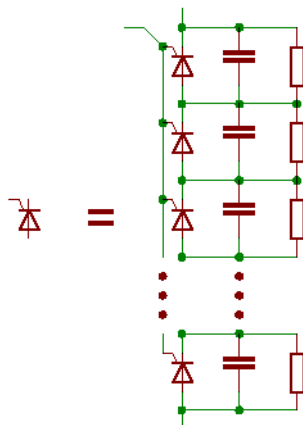
## Wysokonapięciowe prostowniki i falowniki dużej mocy

Dla mocy rzędu megawatów w zasadzie niepodzielnie królują wielopulsowe układy diodowe i tyrystorowe. Wynika to z wielokrotnie wyższych prądów i napięć przewodzonych przez te elementy niż przez tranzystory. Układy wielopulsowe powstają przez równoległe lub szeregowe połączenie mostków sześciopulsowych [5]. Przy czym w układach wysokiego napięcia mostki łączy się szeregowo. Przykład pokazałem na rys. 3. Wysokie napięcia wymuszają również konieczność łączenia szeregowo elementów półprzewodnikowych.



Rys. 3. Przykładowy prostownik dwudziestoczwieropulsowy

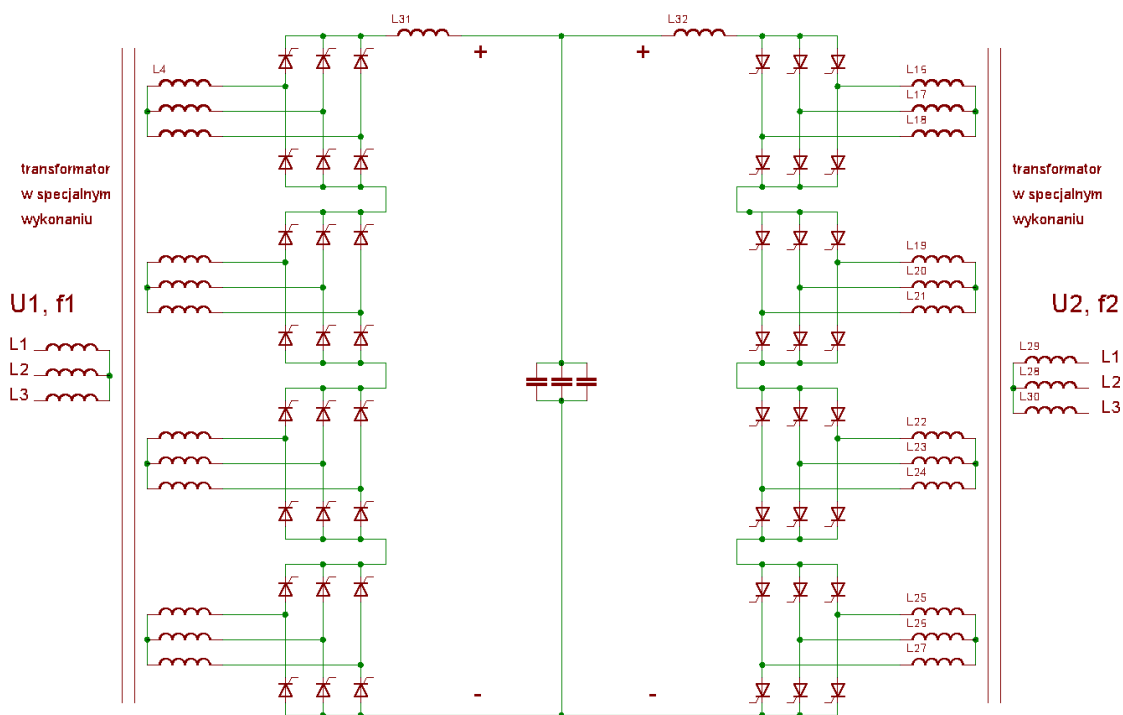
## Ćwiczenie „Energoelektroniczne elementy łączą prądu stałego (TCad)”



Rys. 4. Element wysokonapięciowy

Oprócz prostowników potrzebne są również falowniki. Falowniki mają strukturę identyczną z tą z rys. 3. Różnica polega na tym, że źródło prądu stałego podłącza się odwrotnie niż to jest pokazane na rys. 3. Oprócz zmiany polaryzacji zmienia się również sposób sterowania tyrystorów. Całość układu ma schemat uproszczony jak na rys. 5. Zmiana kierunku przepływu energii jest realizowana poprzez zmianę polaryzacji obwodu prądu stałego i zmianę sposobu wysterowania tyrystorów.

Ponieważ układy tyrystorowe to układy o komutacji sieciowej, potrzebują do pracy napięcia sieci. W wypadku prostownika wydaje się to oczywiste. Jednak falownik też potrzebuje napięcia sieci do wymuszenia komutacji elementów. Musi zatem współpracować z innym źródłem. Szczegółowy opis falowników tyrystorowych można znaleźć w [4].



Rys. 5. Uproszczony schemat ideowy łączą prądu stałego

## Obliczanie mocy

Dla przypomnienia podaję kilka wzorów, aby ułatwić wykonywanie obliczeń. Szczegóły dotyczące teorii mocy można znaleźć w [6] lub innych podręcznikach do elektrotechniki. Przytoczone wzory mają jedynie ułatwić poszukiwania.

Moc czynną definiuje się jako wartość średnią z mocy chwilowej. Dla przebiegów okresowych można liczyć ją dla jednego okresu:

$$P = \int_0^T p(t) dt = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

gdzie T – okres przebiegu napięcia lub prądu.

Moc pozorną definiuje się jako iloczyn wartości skutecznych prądu i napięcia: chwilowej:

$$S = UI = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2)$$

Współczynnik mocy:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos\varphi_1 \quad (3)$$

gdzie: P – moc czynna; S – moc pozorna;  $I_1$  – wart. skuteczna 1. harm.;

I – wartość skuteczna prądu odkształconego;  $\cos\varphi_1$  – cosinus kąta przesunięcia fazowego pomiędzy 1. harmoniczną prądu a 1. harmoniczną napięcia.

Wartość przesunięcia fazowego  $\varphi_1$  można wyznaczyć z rozkładu na szereg Fouriera napięcia i prądu stosując wzór (4) [1]:

$$\varphi_1 = \psi_{i1} - \psi_{u1} \quad (4)$$

gdzie:  $\psi_{i1}$  – faza początkowa pierwszej harmonicznego prądu;  $\psi_{u1}$  – faza początkowa pierwszej harmonicznego napięcia.

We wszystkich symulacjach w ćwiczeniu E32 wymuszeniami są nieodkształcone przebiegi napięć:

- 50 Hz, dla którego  $\psi_{u1} = 90,010$
- 30 Hz, dla którego  $\psi_{u1} = 89,880$

Odpowiednie kąty  $\psi_{i1}$  należy wyznaczyć.

Na podstawie otrzymanych przebiegów, w stanie ustalonym, można wyliczyć moce przebiegów stosując przytoczone wzory, rozkład Fouriera przebiegów i całkowanie numeryczne (np. jednopunktową całkę Eulera).

## Instrukcja postępowania

Ćwiczenie polega na badaniu prądu pobieranego z sieci pierwotnej, prądu przekazywanego do sieci wtórnej oraz rozplądów mocy.

## Ćwiczenie „Energoelektroniczne elementy łączy prądu stałego (TCad)”

Należy pamiętać, że badane modele są bardzo uproszczone i w praktyce można spotkać układy o znacząco lepszych parametrach i nieco odmiennej konstrukcji.

Ćwiczenie należy wykonywać w podanej niżej kolejności. W razie jakichkolwiek wątpliwości należy pytać Prowadzącego.

W ćwiczeniu wykorzystywany jest plik `lacze_dc.sch`, który zawiera model do symulacji działania prostownika i falownika `moce.xls` ułatwiającego wykonanie sprawozdania do ćwiczenia.

Na koniec ćwiczenia, w wyniku przeprowadzenia symulacji powinno, między innymi powstać:

- 12 plików z wynikami symulacji z rozszerzeniem `dat`,
- 12 plików z harmonicznymi z rozszerzeniem `txt`.

Sugeruję przynieść jakiś nośnik danych lub wysłać sobie pakiet z wynikami pracy pocztą.

### 1. Badanie łączy prądu stałego

1. Otworzyć TCad i plik symulacyjny `lacze_dc.sch`
2. Sprawdzić wartość zadanego prądu w obwodzie DC (zmienna `DC_PRAD_ZAD`) na 1000 A
3. Ustawić napięcie i częstotliwość obu źródeł pierwotnego (`PIERW_F`, `PIERW_SK`) i wtórnego (`WTOR_F`, `WTOR_SK`) na wartość 15750 V i 50 Hz
4. Przeprowadzić symulację
5. Przeprowadzić i zapisać analizę harmonicznymi prądów, zapisać wyniki w plikach `dc1_1000_*.txt`
6. Zapisać obraz z odpowiednio rozciągniętym przebiegiem prądu wejściowego.
7. Zakończyć symulację
8. Zmienić nazwę pliku `lacze_dc.dat` na `dc1_1000.dat`
9. Ustawić prąd zadany na inną wartość podaną przez prowadzącego i powtórzyć punkty 3 – 8; przeprowadzić symulacje w sumie dla trzech wartości prądów zadanych
10. Powtarzać czynności 2 – 9 podstawiając zadane przez prowadzącego częstotliwości i napięcia `PIERW_F`, `PIERW_SK`, `WTOR_F`, `WTOR_SK`.

### 2. Obliczenia

Dla każdej symulacji wyznaczyć moc pobieraną z układu pierwotnego, moc w obwodzie prądu stałego, moc przekazywaną do układu wtórnego. Należy wyznaczyć moce czynną, bierną oraz odkształcenia, współczynniki mocy i THD po obu stronach.

## Sprawozdanie

W sprawozdaniu zamieścić:

- schematy badanych układów i krótki opis wykonywanych czynności w trakcie ćwiczenia,
- przebiegi prądów w funkcji czasu w stanie ustalonym (skopiować ekrany),
- wykresy widm prądów,
- stosowne obliczenia wg p. 5,

We wnioskach zamieścić spostrzeżenia odnośnie przydatności TCad'a do symulacji omawianych zagadnień. Jeżeli studenci mają własne doświadczenia pokusić się o porównanie z innymi pakietami. Zaproponować poprawki w programie.

## Literatura

- [2] Kujarczyk Sz. i inni: Elektroenergetyczne układy przesyłowe. WNT 1997
- [3] [www.enercon.de](http://www.enercon.de)
- [4] Barlik, Nowak: Poradnik inżyniera energoelektronika.
- [5] Biczek P., Kłos M.: Czyżby renesans układów tyrystorowych. Podstawowe Problemy Elektrotechniki i Elektromechaniki PPEE'05. Wisła  
<http://www.ee.pw.edu.pl/~biczelp/teksty/ppee2005.pdf>
- [6] Strzelecki R., Supronowicz H.: Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.