

Tadeusz RODACKI

Jerzy SOBCZAK

KOMPUTEROWA SYMULACJA UKŁADÓW ZASILANIA ŁUKU PRĄDU STAŁEGO - MODELE MATEMATYCZNE UKŁADÓW ZASILANIA I REGULACJI

Streszczenie. Celem artykułu było opracowanie modelu matematycznego zasilaczy łuku prądu stałego. Treść referatu obejmuje tematykę związaną z komputerową analizą 2 układów zasilania. Pierwszy układ zbudowany jest na podstawie trójfazowy regulatora napięcia po stronie pierwotnej transformatora z mostkiem diodowym po stronie wtórnej, drugi natomiast zbudowany jest na podstawie trójfazowego mostek tyrystorowy po stronie wtórnej transformatora z dodatkowym źródłem napięcia. Zaproponowano też 2 układy regulacji prądu łuku. Pierwszy układ regulacji z jednym regulatorem prądu, drugi układ z dwoma regulatorami: prądu i napięcia.

COMPUTER - BASED SIMULATION OF D.C. ELECTRIC ARC SUPPLY SYSTEMS - MATHEMATICAL MODELS OF SUPPLY AND CONTROL CIRCUITS

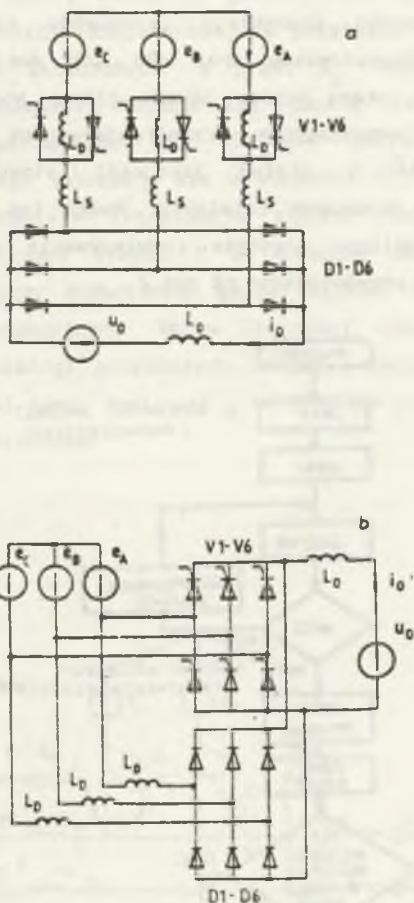
Summary. The objective of the work is to produce a mathematical model of d.c. electric arc supply systems. The analysis of two supply systems is presented. The first system is based on three - phase voltage controller connected to a primary circuit of the transformer. The second system is built with three - phase thyristor bridge connected to the secondary circuit of the transformer with an extra voltage source. Two controller networks have been shown - the first one using one current controller, the second one with one voltage controller and one current controller.

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИМУЛЯЦИЯ ПИТАЮЩЕЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА - МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СХЕМ ПИТАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

Резюме. Целью работы было разработание математической модели схем питания электрической дуги постоянного тока. Работа была посвящена тематике компьютерного анализа двух цепей питания. Первая цепь построена на основе 3-фазного регулятора напряжения в первичной обмотке трансформатора с применением диодного моста во вторичной обмотке. Вторая цепь построена на основе 3-фазного тиристорного моста с применением добавочного источника питания. Предложены две системы регулирования тока дуги - первая с регулированием тока, вторая с двумя регуляторами: тока и напряжения.

1. WSTĘP

W nowoczesnej minihucie piec łukowy prądu stałego jest głównym urządzeniem w łańcuchu produkcyjnym wytwarzania stali. Ze względu na zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych oraz mniejszą uciążliwość dla środowiska tego rodzaju pieców w porównaniu z piecami łukowymi prądu zmiennego, zainteresowanie nimi znacznie wzrosło w ostatnich latach. Rozwój nowych technologii z zastosowaniem pieców łukowych prądu stałego stworzył zapotrzebowanie na nowoczesne wysokosprawne układy zasilania tych urządzeń energią elektryczną zapewniające optymalne parametry w stanach statycznych i dynamicznych, pozwalające realizować dowolny proces technologiczny. Uwzględniając prace [1] i [2] do symulacji komputerowej urządzenia łukowego, wybrano dwa rozwiązania układów zasilania. Rozwiązanie pierwsze to zasilacz łuku prądu stałego zbudowany na podstawie trójfazowego mostek tyrystorowego po stronie wtórnej transformatora z dodatkowym źródłem napięcia, rozwiązanie drugie to zasilacz z tyrystorowymi sterownikami napięcia po pierwotnej stronie transformatora z mostkiem diodowym po wtórnej. Zasilacze tyrystorowe łuku prądu stałego spełniają w pełni żądane wymagania jedynie wówczas, gdy są zaopatrzone w odpowiedni układ regulacji, zapewniający odpowiednie ukształtowanie charakterystyk zewnętrznych, poszerzenie zakresu regulacji, zwiększenie dokładności regulacji prądu, poprawienie dynamiki i ograniczenie przeregulowań prądu w stanach przejściowych. Na podstawie analiz układów regulacji, przeprowadzoną w pracach [1] i [2], zaproponowano współpracę układów zasilania z dwoma układami regulacji: pierwszy z jednym regulatorem prądu, drugi z dwoma regulatorami: prądu i napięcia. Szczegółowe omówienie zasady działania układów zasilania łuku prądu stałego z rys.1 tzn: sposobów regulacji prądu łuku, napięcia łuku, ograniczenie pulsacji prądu zasilającego, zapewnienie ciągłości i odpowiednie wygładzenie prądu łuku, zostało przedstawione w pracach [1] i [2]. W pracach tych została również przedstawiona analiza układów regulacji prądu łuku z przyjęciem założeń upraszczających, pozwalających obliczyć wymagane nastawy regulatorów tylko w sposób przybliżony. Program komputerowej symulacji jest podsumowaniem prac zawartych w ww publikacjach.

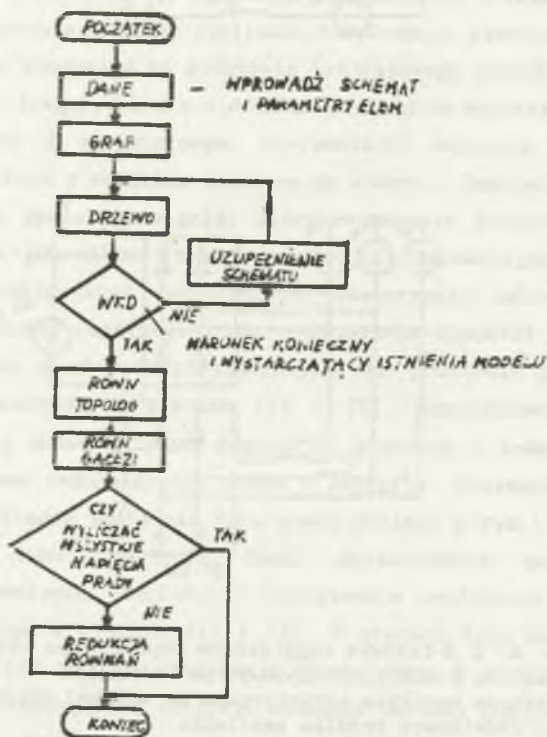


Rys.1. Zasilacz: a) z 3-fazowym regulatorem napięcia po stronie pierwotnej transformatora z mostkiem diodowym po wtórnej,
 b) z 3-fazowym mostkiem tyrystorowym po wtórnej stronie transformatora z dodatkowym źródłem zasilania.

Fig.1. Supply system: a) with three - phase voltage controller connected to the primary circuit of the transformer and the diode bridge connected to the secondary circuit of the transformer
 b) with three - phase thyristor bridge connected to the secondary circuit of the transformer with an extra voltage source

2. MODELE MATEMATYCZNE UKŁADÓW ZASILANIA

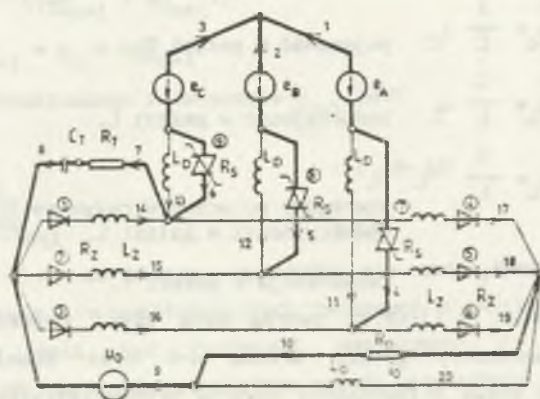
Z powodu złożonego charakteru przebiegów czasowych w gałęziach analizowanych przekształtników oraz dla ich dokładnego wyznaczenia w przypadku dowolnego stanu pracy, obwody główne modelowano jako sieci o stałej topologii z jednoznacznym przyporządkowaniem ich gałęzi do drzewa i dopełnienia. Modele o stałej topologii stosuje się do analizy przekształtników o nieznanym działaniu. Model ten odwzorowuje wszystkie możliwe stany struktury. Algorytm rozwiązywania układów metodą modelu stałostrukturalnego przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Algorytm rozwiązywania układów metodą stałej struktury.

Fig.2. Algorithms for solving networks with the help of constant topology method

Zawory półprzewodnikowe w takim modelu można przedstawić jako rezystancje o wartościach zależnych od stanu pracy zaworów. Najczęściej zawory przedstawiane są jako elementy dwustanowe. W takim podejściu uwzględniamy tylko parametry statyczne zaworu, ale dzięki temu znacznie upraszczamy proces symulacji komputerowej. W programie przez R_F oznaczono rezystancję tyrystorów załączonych, a przez R_D rezystancję tyrystorów wyłączonych. Diody prostownika opisuje się również sterowanymi w funkcji stanu przewodzenia parametrami R_Z . Wartości rezystancji dla stanu przewodzenia i zaworowego zmieniają się w stosunku 10^5 , a dla tyrystorów 10^4 . Przyjmując rzeczywiste rezystancje zaworu rzędu 10^7 uzyskujemy niewielką poprawę obliczeń (rzędu 1 %) kosztem znacznego wydłużenia obliczeń. To samo dotyczy dodatkowych gałęzi drzewa, wprowadzonych celem eliminacji rozcięć indukcyjnych. Wpływ obecności tych gałęzi w grafie przekształćka na przebiegi pozostałych prądów i napięć jest znikomy. Na rys.3 przedstawiono graf sieci zasilacza z trójfazowym sterownikiem napięcia i prostownikiem nie sterowanym.



Rys.3. Graf sieci zasilacza z trójfazowym sterownikiem napięcia i prostownikiem niesterowanym.

Fig.3. Graph of the supply system with three - phase voltage controller and diode rectifier

Graf z rys. 3 o gałęziach drzewa 1-10 i dopełnieniu 11-20 opisuje macierz cykli drzewa $\underline{B}_T$:

$$\underline{B}_T = \begin{bmatrix} & & & & -1 & & & & & & & 11 \\ & & & & & -1 & & & & & & 12 \\ & & & & & & -1 & & & & & 13 \\ & & & & & & & 1 & 1 & & & 14 \\ & & 1 & -1 & & -1 & 1 & 1 & 1 & & & 15 \\ & 1 & & -1 & -1 & & 1 & 1 & 1 & & & 16 \\ & & & & & & -1 & -1 & 1 & 1 & & 17 \\ & & -1 & 1 & & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 18 \\ -1 & & & 1 & 1 & & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 19 \\ & & & & & & & & & & -1 & 20 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Prądy gałęzi $\underline{i}_T$ wyraża się przez prądy cięciw $\underline{i}_L$, a napięcia cięciw $\underline{u}_L$ przez napięcia drzewa $\underline{u}_T$ następująco:

$$\underline{i}_T = \underline{B}_T^T \underline{i}_L, \quad (2.2)$$

$$\underline{u}_L = -\underline{B}_T \underline{u}_T.$$

Każda gałąź grafu opisana jest zależnością odpowiednią do elementu w niej zawartego:

$$\begin{aligned} \underline{u}_C &= \frac{1}{C} \underline{i}_C && \text{pojemność w gałęzi T,} \\ \underline{i}_L &= \frac{1}{L} \underline{u}_L && \text{indukcyjność w gałęzi L,} \\ \underline{i}_L &= \frac{1}{L} (\underline{u}_L - R \underline{i}_L) && \text{szeregowe połączenie rezystancji i} \\ &&& \text{indukcyjności w gałęzi L,} \\ \underline{u}_T &= R \underline{i}_T && \text{rezystancja w gałęzi T.} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Równania sieci (2.1)-(2.3) tworzą opis sieci przekształtnika. Należy pamiętać, że parametry gałęzi drzewa 4-6 oraz dopełnienia 14-19 są uzależnione od stanu przewodzenia zaworów przekształtnika (zawory na rys.3 ponumerowane są od 1 do 9). Przyjmując, że stan tych zaworów jest określony wektorem

$$\underline{F} = [F_1, \dots, F_9]^T = \underline{F}(t)$$

$$\text{gdzie } F_k = \begin{cases} 1 & \text{dla zaworu załączonego,} \\ 0 & \text{dla zaworu wyłączzonego,} \end{cases}$$

otrzymamy w wyniku, równania sieci o współczynnikach zmiennych w czasie wraz z przebiegiem czasowym funkcji $\underline{F}(t)$. Rozwiązanie równania sieci metodą numeryczną wymaga ich przedstawienia w postaci równań stanu, które powstają w wyniku eliminacji prądów i napięć nie będących zmiennymi stanu. W rozpatrywanym modelu zasilacza występuje jedna pojemność i 10 niezależnych indukcyjności. Równanie stanu będzie zatem 11 rzędu. Wektor stanu zdefiniowano następująco:

$$\underline{x}^T = [x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} x_{11}] = [i_{14} i_{15} i_{16} i_{17} i_{18} i_{19} i_{11} i_{12} i_{13} u_8 i_{20}]$$

a równanie ma postać:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{W}\underline{x} + \underline{V}\underline{u}, \quad (2.4)$$

przy czym

$$\underline{W} = \underline{W}[\underline{F}(t)], \quad \underline{V} = \underline{V}[\underline{F}(t)].$$

Współczynniki macierzy $\underline{W}, \underline{V}$ są więc funkcjami czasu, co wynika z ich zależności od wektora $\underline{F}(t)$. Wektor $\underline{u}$ zawiera przebiegi czasowe sem sieci $e_{A,B,C}$ oraz napięcie łuku u_0 . Ze względu na przyspieszenie działania programu zdecydowano się na wprowadzenie najprostszego algorytmu uwikłanego do rozwiązania równania (2.4), wzoru interpolacyjnego Eulera.

$$\underline{x}_{n+1} = \underline{x}_n + h\underline{W}\underline{x}_{n+1}$$

a zatem

$$\underline{x}_{n+1} = \underline{x}_n + h(\underline{W}\underline{x}_{n+1} + \underline{V}\underline{u}_{n+1}), \quad (2.5)$$

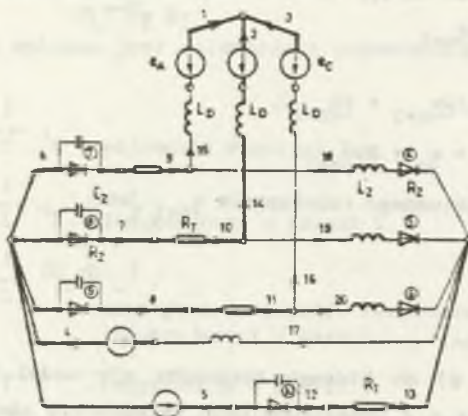
$$(1 - h\underline{W})\underline{x}_{n+1} = \underline{x}_n + h\underline{V}\underline{u}_{n+1}.$$

Ostatecznie dla poszukiwanego rozwiązania $\underline{x}_{n+1}$ jest:

$$\begin{aligned} \underline{A}\underline{x}_{n+1} &= \underline{B}, \\ \underline{A} &= 1 - h\underline{W}, \\ \underline{B} &= \underline{x}_n + h\underline{V}\underline{u}_{n+1}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Linowe równanie (2.6) do którego sprowadza się model przekształtnika z rys.3 posiada macierz $\underline{A}$ o współczynnikach zmiennych w chwilach zmian stanu zaworów. Wektor $\underline{B}$ musi być natomiast wyznaczony w każdym kroku obliczeń. Wynika stąd, że najskuteczniejszą metodą rozwiązania równania (2.6) jest użycie rozkładu L-U ponieważ najbardziej czasochłonna operacja jaką jest wyznaczenie nowych podmacierzy $\underline{L}, \underline{U}$ musi być przeprowadzana sporadycznie, zaś w każdym kroku obliczeń wykonuje się tylko podstawianie wstecz. Tak więc model matematyczny zasilacza jest określony przez przyporządkowanie zmiennych gałęziowych w wektorze stanu, wyznaczenie

wyrazow macierzy $\underline{W}, \underline{V}$ i przez procedurę obliczania aktualnej wartości funkcji $\underline{F}$ stanu zaworów. Graf zasilacza z równolegle połączonymi prostownikami (sterowanym i diodowym) zamieszczono na rys.4. W celu zmniejszenia liczby gałęzi, i co za tym idzie rzędu równań opisujących model, prostownik sterowany zasilany ze źródła o małej indukcyjności przedstawiono tu w postaci szeregowego połączenia gałęzi nr.5,12,13. Źródło napięcia u_p w gałęzi 5 ma taki przebieg czasowy jak napięcie wyjściowe prostownika tyrystorowego o pomijalnie małym czasie komutacji. Dioda w gałęzi 10 modeluje jednokierunkowe przewodzenie tego prostownika W grafie z rys.4 zawory oznaczone numerami 7-10 przypisano gałęziom drzewa, stąd do sterowanych rezystorów $R_{z7}-R_{z10}$ włączone są równolegle pojemności $C_{z7}-C_{z10}$ o wartościach uzależnionych od stanu tych zaworów.



Rys.4. Graf sieci zasilacza z równolegle połączonymi prostownikami: tyrystorowym i diodowym

Fig 4. Graph of the supply system with thyristor and diode rectifiers connected in parallel

Macierz cykli drzewa ma tu postać:

$$\underline{B}_T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 1 & -1 & & & & 1 & -1 & & 1 & -1 & & & & -1 \\ & -1 & 1 & & & & -1 & 1 & & -1 & 1 & & & -1 \\ & & & 1 & -1 & & & & & & & 1 & 1 & \\ & & & & 1 & 1 & & & 1 & & & -1 & -1 & \\ & & & & 1 & & 1 & & & 1 & & -1 & -1 & \\ & & & & 1 & & & 1 & & & 1 & -1 & -1 & \end{bmatrix} \begin{matrix} 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \end{matrix} \quad (2.7)$$

W tym przypadku równania sieci (2.2), (2.3) muszą być uzupełnione o opis równoległych gałęzi R_z , C_z , gałęzie 6,7,8,12 w drzewie:

$$u_T = \frac{1}{C_z} (i_T - \frac{1}{R_z} u_T). \quad (2.8)$$

Dodatkowo w przypadku modeli zaworów w drzewie, niezbędne są gałęzie z "tłumiącymi" rezystancjami R_t , o numerach 9,10,11,13. Parametry k-tej gałęzi zaworu należącej do drzewa, są uzależnione następująco:

$$\begin{aligned} R_{ZK} &= R_F + R_R(1 - F_K), \\ C_{ZK} &= C_R + C_F F_K, \\ R_{TK} &= R_{TR} (1 - F_K). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Przy tym $C_F \gg C_R$, zaś wartości C_R, R_{TR} są takie jak elementów zabezpieczenia zaworu od przepieć komutacyjnych. Z wzoru (2.9) wynika, że w stanie załączenia k-tej gałęzi zaworowej, szeregową rezystancją R_T jest równa zero, a równoległa gałąź zaworu C_z przyjmuje dużą wartość. Pokazane postępowanie pozwala zastosować względnie duży krok całkowania równań modelu przy dobrym tłumieniu oscylacji z elementami LC (w przypadku "tłumiących" gałęzi z rezystorami R_T , w cyklach tych pojawiają się praktycznie nietłumione, niepoprawne przebiegi drgające). Eliminując prądy i napięcia gałęzi nie zawierających elementów dynamicznych otrzymuje się równanie stanu modelu w postaci (2.4), gdzie wektor stanu ma postać:

$$X^T = (x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10}) = (i_{15} i_{16} i_{17} i_{18} i_{19} i_{20} u_6 u_7 u_8 u_{12}).$$

Stosując wzór interpolacyjny Eulera do równania stanu, uzyskamy liniowe równanie (2.6) wygodne do modelowania komputerowego, w którym macierze $\underline{A}, \underline{B}$ będą obliczane przez odpowiednie procedury (macierz $\underline{A}$ tylko przy zmianach wyrazów macierzy stanu $\underline{W}$ lub przy zmianie kroku h , zaś macierz $\underline{B}$ w każdym

roku obliczeń). Powyższe rozważania przeprowadzono zakładając obciążenie wyjścia zasilacza rezystancją. Przy takim założeniu, przebiegi napięcia i prądu wyjściowego, zwłaszcza w stanach nieustalonych, mogą znacznie odbiegać od pojawiających się w rzeczywistym zasilaczu obciążonym indukcyjnością dławika wygładzającego i łukiem o nieliniowych i zmieniających się w czasie charakterystykach.

3. MODELOWANIE CHARAKTERYSTYK ŁUKU

Ocena właściwości regulacyjnych zasilacza tyrystorowego o wybranym obwodzie głównym i układzie sterowania może być poprawna tylko przy uwzględnieniu nieliniowych zależności prądu i napięcia łuku oraz zakłóceń wprowadzonych do zasilacza od strony wejścia i wyjścia. Przebiegi napięcia łuku nawet przy wymuszonym prądzie mają w rzeczywistości charakter bardzo złożony i zależą od wielu czynników, toteż podanie wzorów opisujących ich dynamikę jest bardzo trudne. Dlatego przy symulacji pracy zasilacza, zakłócenia wprowadzone od strony wyjścia modelowano jako skokowe przejścia z charakterystyki statycznej o wybranym przebiegu, na inną. Należy podkreślić że przy normalnej pracy zasilacza łuku, tak gwałtowne zmiany łuku nie występują. Z uwagi na to, przebiegi nieustalone przy skokowych przejściach pomiędzy bardzo różniącymi się charakterystykami, otrzymane symulacyjnie, opisują pracę zasilacza w warunkach trudniejszych od rzeczywistych. W programach Z1 i Z2 wprowadzono 5 zależności napięcia łuku od prądu łuku ($U_o = f(i_o)$), przy czym charakterystyki 1-3 są zbliżone do teoretycznych, krzywa 5 została wprowadzona dla celów porównawczych (pochodne du/di dla tej charakterystyki są znacznie większe niż dla krzywych 1-3). Krzywa 4 jest charakterystyką narastającą liniowo. Modelowe charakterystyki $U_o(i_o)$ mają postać:

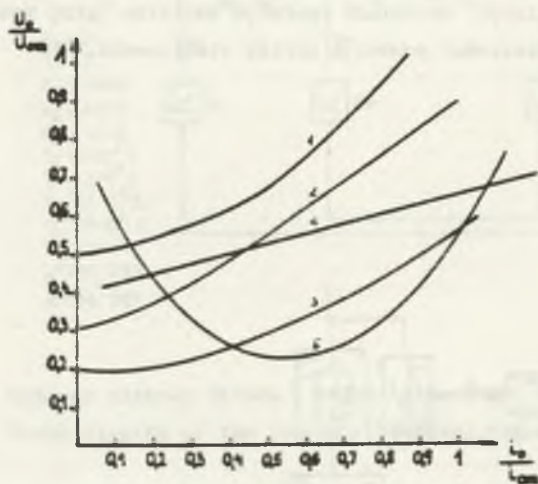
-krzywa 1
$$U_o = U_m (0,2 + 0,37(i_o/i_m)^2),$$

-krzywa 2
$$U_o = U_m (0,3 + 0,6 (i_o/i_m)^2),$$

-krzywa 3
$$U_o = U_m (0,4 + (i_o/i_m)^2),$$

-krzywa 4
$$U_o = U_m (0,4 + 0,25 i_o/i_m),$$

-krzywa 5
$$U_o = U_m (0,2 + 1,7(i_o/i_m - 0,55)^2),$$



Rys.5. Charakterystyki prądowo napięciowe łuku

Fig.5. Current - voltage characteristics of electric arc

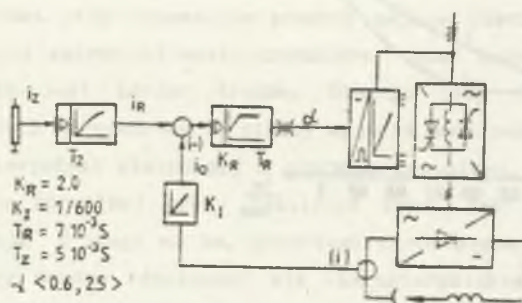
4. MODELE UKŁADÓW REGULACJI PRĄDU ŁUKU

Obliczenia komputerowe zamkniętych układów regulacji dla obu przedstawionych wersji zasilaczy, przeprowadzono zakładając dwa rodzaje regulacji prądu łuku. Układ podstawowy z pojedynczym regulatorem prądu, dla zasilacza z rys.1a pokazuje schemat blokowy na rys. 6. Parametry regulatora K_{PR} i filtra T_Z dobrano na podstawie ciągu testów symulacyjnych, tak by otrzymać możliwe małe czasy regulacji przy szybkich zmianach wartości zadanej i_z oraz przy skokowych zmianach charakterystyk obciążenia. Uwzględniono tu pracę w różnych obszarach każdej z 5 modelowanych

charakterystyk $u_o(i_o)$ tak przy zmniejszeniu, jak i wzroście prądu łuku. W efekcie, z obliczeń prowadzonych dla przyjętych danych zasilacza i obciążenia, wynika, że pojedynczy regulator prądu typu PI, ma posiadać parametry:

$$K_R = 2, \quad T_R = 7 \text{ ms}, \quad T_Z = 5 \text{ ms}.$$

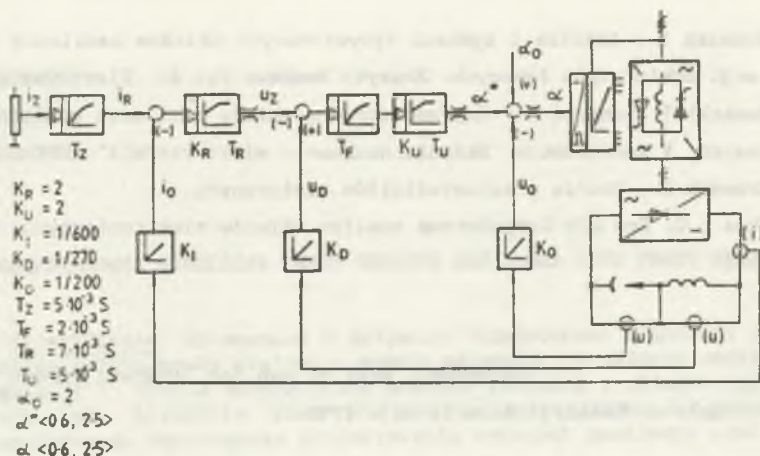
Wprowadzenie mniejszego wzmocnienia lub większych stałych czasowych prowadzi do pogorszenia czasów regulacji, natomiast operacje odwrotne, przy znacznych odstępstwach od podanych wielkości powodują utratę stabilności.



Rys.6. Schemat blokowy układu z regulatorem prądu

Fig.6. Block diagram of the current regulator network

Zasilacz z dwoma prostownikami w obwodzie głównym z rys.1b pracuje w podstawowej wersji układu regulacji identycznej jak na rys.6. Szczegółowe badania reakcji modelu w różnych stanach przejściowych, pokazały, że dane obwodu regulacji powinny być jak dla zasilacza z 3-fazowym regulatorem napięcia. Jedynie stała czasowa regulatora winna być nieco większa: $T_R = 10 \text{ ms}$. Jakość regulacji prądu łuku dla obu zasilaczy jest bardzo zbliżona. Różnice występują przy skokowej zmianie wartości zadanej, gdy napięcie łuku jest znacznie mniejsze od maksymalnego napięcia u_{po} prostownika sterowanego. Schemat blokowy układu z dwoma regulatorami, dla zasilacza ze sterownikiem napięcia przemiennego przedstawiono na rys.7.



Rys.7. Schemat blokowy układu z regulatorem prądu i napięcia.

Fig.7. Block diagram of the current - voltage regulator network

Obecność dwóch czujników napięcia: łuku i dławika jest niedogodnością w realizacji praktycznej tego układu. Podstawą struktury z dwoma regulatorami była jednak jakość regulacji prądu i_o , a nie maksymalna prostota układu. Porównanie wyników symulacji wskazuje na wyższość tego rozwiązania, nad układem z jednym regulatorem prądu. Polega to zwłaszcza na bardzo skutecznej stabilizacji przebiegu prądu łuku $i_o(t)$ przy dużych skokowych zmianach napięcia $u_o(t)$, a przy stałej zadanej wartości $i_z = \text{const}$. Identyczny układ regulacji zastosowano też do zasilacza z dwoma prostownikami. Różnice występujące w procedurach REGIU opisujących ten układ w programach Z1, Z2 wynikają tylko z różnic w modelowaniu sterowników tyrystorów obydwu zasilaczy i mają drugorzędne znaczenie (wzrostowi sygnału sterującego w przypadku 3-fazowego regulatora tyrystorowego towarzyszy wzrost kąta załączenia, gdy dla prostownika tyrystorowego relacja ta jest odwrotna). Opracowane modele matematyczne obwodów głównych i układów regulacji prądu oraz programy do obliczeń i analizy pozwoliły stworzyć program uniwersalny do badania i komputerowego wspomagania projektowania wybranych zasilaczy łuku prądu stałego.

LITERATURA

- [1] Rodacki T.: Analiza i synteza tyrystorowych układów zasilania i regulacji odbiorników łukowych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. Elektryka z.96/1985
- [2] Rodacki T. Kandyba A.: Energooszczędne układy zasilania odbiorników łukowych. V konferencja "Badania naukowe w elektrotermii". Ustroń 1991.
- [3] Grzesik B. Teoria przekształtników statycznych
- [4] Chua L.O. Pen Lin Komputerowa analiza układów elektronicznych. WNT W-wa 1981.

Recenzent: prof.dr hab.inż. Andrzej Jordan

Wpłynęło do Redakcji dnia 14 maja 1992 r.

A b s t r a c t

In the modern steel plant the d.c.electric arc furnace is the main element in the process of steel production. Since the running costs are lower and the d.c. electric arc furnaces are less harmful to the environment than the a.c. electric arc furnaces, they have become of great interest in the last few years. The development of new technologies using d.c. electric arc furnaces has created the need for highly efficient supply systems, which would ensure the best possible ratings under changing conditions, in both static and transient states, allowing any engineering process. The object of the work is to produce a mathematical model of d.c. electric arc supply systems. The analysis of two supply systems is presented. The first system is based on three - phase voltage controller connected to primary circuit of the transformer. The second system is built with three - phase thyristor bridge connected to the secondary circuit of the transformer with an extra voltage source. Both circuits are shown in Fig.1. The mathematical models of the supply systems are presented in Chapter 2 (graph of the supply system, fundamental loop matrix, space state vector). The mathematical characteristics of electric arc are shown in Chapter 3. Chapter 4 presents two controller networks - the first one with one voltage controller, the second one with one voltage controller and one current controller.