ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1981

Seria: ELEKTRYKA z. 75 Nr kol. 681

Tadeusz RODACKI

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

Andrzej DUDA

Instytut Elektrotechniki
WSI Opole

STATYCZNA I DYNAMICZNA STABILNOŚĆ ŁUKU ELEKTRYCZNEGO

Streszczenie. W artykule wyprowadzono i przeanalizowano warunki statycznej i dynamicznej stabilności pracy łuku elektrycznego.

1. Wstęp

Rozwój techniki półprzewodnikowej umożliwił zastosowanie tyrystorów do budowy regulowanych źródeł zasilania łuku elektrycznego. Zarówno tyrystorowe układy zasilania, jak i układy klasyczne (transformatory i generatory spawalnicze) powinny przede wszystkim zapewnić ciągłe (stabilne) wyładowania łukowe w całym zakresie regulacji. Dlatego celowe jest poznanie warunków koniecznych do zapewnienia stabilnej pracy łuku. W celu ich określenia należy przeanalizować zjawiska związane ze współpracą źródła zasilania z łukiem elektrycznym (warunki stabilności statycznej), a dla łuku prądu przemiennego ponadto zjawiska zachodzące przy powtórnym zapalaniu się łuku przy prądach bliskich zeru (warunki stabilności dynamicznej). Otrzymane wyniki przydatne będą przy projektowaniu źródeł zasilania łuku elektrycznego.

2. Warunki statycznej stabilności palenia się łuku

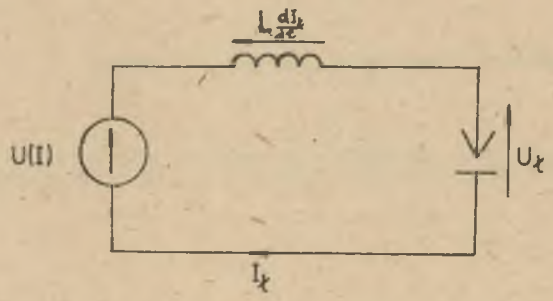
W ogólnym przypadku stabilność dowolnego procesu fizycznego ocenia się wg jego zmiany energii. Zmiana energii Q w jednostce czasu $\frac{dQ}{dt}$ określona jest różnicą między mocą dostarczaną do systemu P_d i oddaną przez system P_o

$$\frac{dQ}{dt} = P_d - P_o.$$

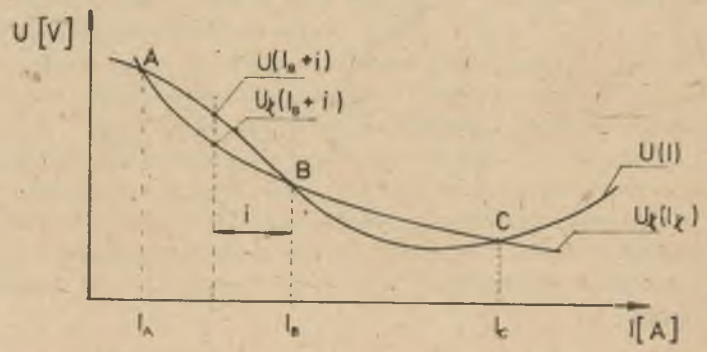
Jeżeli w łuku elektrycznym, rozpatrywanym wg tej zasady, przyrost energii $dQ = 0$, to wszystkie jego parametry pozostają niezmienione. Jest to stan ustalony, najbardziej pożądany w procesach jarzenia się łuku. Dla łuku elektrycznego moc oddawaną P_o można w większości wypadków uważać za stałą. Dlatego stabilność łuku określona jest przez stałość mocy P_d dostarczonej do łuku. Dla obwodu zasilania łuku (rys. 1) można napisać równanie:

$$U(I) = L\frac{dI_ł}{dt} + U_ł(I_ł), \tag{1}$$

gdzie funkcja $U_ł(I_ł)$ określa statyczną charakterystykę łuku, a funkcja $U(I)$ charakterystykę zewnętrzną źródła zasilania (rys. 2).



Rys. 1



Rys. 2

W przypadku gdy $\frac{dI_ł}{dt} = 0$ punkt pracy układu zasilania łuku wyznaczony jest przez punkty A,B lub C przecięcia charakterystyk statycznych źródła zasilania i łuku. Określmy, który z punktów A,B,C będzie punktem stabilnej pracy układu.

Przypuśćmy, że w chwili $t = 0$ z dowolnej przyczyny prąd łuku uległ zmianie o wartości $i(0) = \Delta I$. Oznaczmy jednocześnie przez $i(t)$ bieżącą wartość odchylenia prądu łuku od wartości $I_{A,B,C}$. Dla każdej chwili $t > 0$

prąd łuku będzie równy: $I_{ł} = I_{A,B,C} + i(t)$, a równanie (1) przybiera postać

$$U(I_{A,B,C} + i) = L\frac{d}{dt}(I_{A,B,C} + i) + U_{ł}(I_{A,B,C} + i). \tag{2}$$

Funkcje $U(I)$ i $U_{ł}(I_{ł})$ są nieliniowe i przy małych zmianach prądu od wartości $I_{A,B,C}$ wartości $U(I_{A,B,C} + i)$ i $U_{ł}(I_{A,B,C} + i)$ można obliczyć, linearyzując te funkcje w otoczeniu punktów A,B,C:

$$U(I_{A,B,C} + i) = U_{A,B,C} + \left(\frac{\partial U}{\partial I}\right)_{A,B,C} i,$$

$$L\frac{d}{dt}(I_{A,B,C} + i) = L\frac{di}{dt}, \tag{3}$$

$$U_{ł}(I_{A,B,C} + i) = U_{A,B,C} + \left(\frac{\partial U_{ł}}{\partial I_{ł}}\right)_{A,B,C} i.$$

Podstawiając wzór (3) do (2) otrzymujemy równanie

$$\left(\frac{\partial U}{\partial I}\right)_{A,B,C} i - \left(\frac{\partial U_{ł}}{\partial I_{ł}}\right)_{A,B,C} i = L\frac{di}{dt}.$$

Rozwiązanie tego równania przy uwzględnieniu warunku początkowego $i(0)=\Delta I$ ma postać

$$i = \Delta I \exp\left\{-\frac{1}{L}\left[\left(\frac{\partial U_{ł}}{\partial I_{ł}}\right)_{A,B,C} - \left(\frac{\partial U}{\partial I}\right)_{A,B,C}\right]t\right\}. \tag{4}$$

Z równania (4) wynika, że dla zapewnienia stabilnego wyładowania łukowego w warunkach określonych przez punkty przecięcia statycznej charakterystyki źródła zasilania i łuku musi w każdym z tych punktów być prawdziwa nierówność

$$k = \frac{\partial U_{ł}}{\partial I_{ł}} - \frac{\partial U}{\partial I} > 0 \tag{5}$$

Wielkość k nazywamy statycznym współczynnikiem stabilności łuku. Przykładowo, dla źródła zasilania i łuku, o charakterystykach podanych na rys. 2, tylko w punkcie B jest spełniony warunek (5) i dlatego punkt ten jest punktem stabilnej pracy łuku.

3. Warunki dynamicznej stabilności łuku

Stabilność dynamiczna związana jest ze zjawiskami zachodzącymi w przestrzeni międzyelektrodowej przy prądach łuku bliskich zeru. W chwilach tych następuje wzrost działania czynników dejonizacyjnych, co może uniemożliwić ponowny zapłon łuku. Dlatego stabilność dynamiczna palenia się łuku zależeć będzie nie tylko od parametrów elektrycznych układu zasilania łuku elektrycznego, ale także od właściwości fizykochemicznych przestrzeni międzyelektrodowej.

Rezystancję łuku można określić wzorem

$$R = D\exp\left(-\frac{Q}{Q_0}\right) = \frac{U_ł}{I_ł}, \tag{6}$$

gdzie:

Q - energia dostarczana do łuku,

D, Q_0 - stałe.

Z równania (6) można obliczyć szybkość zmian energii $\frac{dQ}{dt}$

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0\left(\frac{1}{I_ł}\cdot\frac{dI_ł}{dt} - \frac{1}{U_ł}\cdot\frac{dU_ł}{dt}\right). \tag{7}$$

Jednocześnie równanie bilansu energii łuku elektrycznego ma postać

$$\frac{dQ}{dt} = U_ł I_ł - P_0. \tag{8}$$

Podstawiając wzór (7) do (8), otrzymujemy zależność określającą dynamiczną charakterystykę napięciowo-prądową łuku

$$Q_0\left(\frac{1}{I_ł}\cdot\frac{dI_ł}{dt} - \frac{1}{U_ł}\cdot\frac{dU_ł}{dt}\right) = I_ł U_ł - P_0. \tag{9}$$

Załóżmy następnie, że w dowolnej chwili $t > 0$ napięcia i prąd łuku można określić równaniem:

$$U_ł = U_{łO} + u(t); \quad I_ł = I_O = i(t); \quad U_ł(0) = U_{łO}; \quad I(0) = I_O;$$

$$P_O = U_{łO}\, I_O.$$

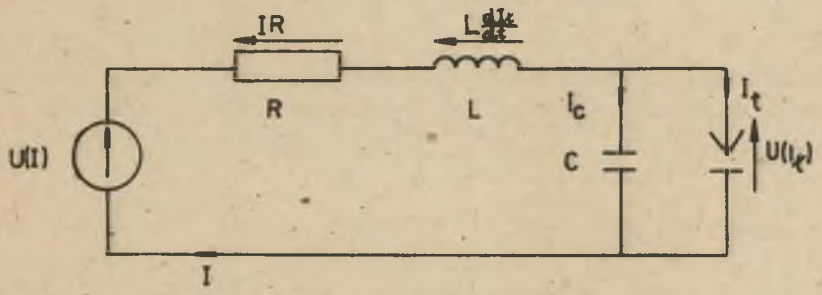
Po podstawieniu wartości $U_ł$ i $I_ł$ do równania (9) i wykonaniu różniczkowania, otrzymamy

$$\Theta\left(U_{łO}\frac{di}{dt} - I_O\frac{du}{dt}\right) = I_O u + U_{łO} i. \tag{10}$$

Wielkość $\theta = \frac{Q_0}{P_0}$ nazywamy stałą czasową łuku. Korzystając jednocześnie ze schematu zastępczego układu zasilania łuku dla stanów dynamicznych (rys. 3), można napisać równanie

$$L\,C\,\frac{d^2u}{dt^2} + RC\,\frac{du}{dt} + u + L\,\frac{di}{dt} + Ri = 0,$$

gdzie R,L,C - parametry elektryczne obwodu zasilania.



Rys. 3

Rozwiązując układ równań (10) i (11) otrzymujemy równanie operatorowe pozwalające określić czasowy przebieg prądu i(t)

$$a_3p^3i + a_2p^2i + a_1p_1i + a_0 = 0, \qquad (12)$$

gdzie:

$a_3 = 1,$

$a_2 = \frac{R}{L} - \frac{1}{\theta} + \frac{1}{R_oC},$

$a_1 = \frac{1}{LC} - \frac{R}{L\theta} + \frac{R}{LCR_0} + \frac{1}{R_0C\theta},$

$a_0 = \frac{R-R_o}{LCR_0\theta}.$

System opisany zależnością (12) jest stabilny, jeżeli współczynniki a_0, a_1, a_2, a_3 spełniają warunki:

$$a_1,\ a_2,\ a_3,\ a_4 > 0 \quad \text{i} \quad a_1\,a_2 - a_0\,a_3 > 0.$$

Z powyższych zależności wynikają równania określające warunki dynamicznej stabilności łuku elektrycznego

$$\frac{R}{L} + \frac{1}{CR_0} - \frac{1}{\theta} > 0$$

$$\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{CR_0} - \frac{1}{\theta}\right)\left(\frac{1}{LC} + \frac{R}{LCR_0} + \frac{1}{CR_0\theta} - \frac{R}{\theta C}\right) - \frac{R-R_0}{LCR_0\theta} > 0 \qquad (13)$$

$$\frac{R}{R_0} - 1 > 0$$

$$\frac{1}{LC} - \frac{R_0}{L\theta} + \frac{R}{LCR_0} + \frac{1}{CR_0\theta} > 0.$$

Ponieważ dla najczęściej spotykanych układów zasilania łuku warunek (13) jest zawsze spełniony ($a_0 < 1.10^{-19}\ s^{-3}$; $a_2 \approx 10^6\ s^{-1}$; $a_1 \approx 10^{14}\ s^{-2}$) i ponieważ $\frac{R}{L} \ll \frac{1}{CR_0}$, warunki dynamicznej stabilności pracy łuku mają postać:

$$\frac{1}{CR_0} > \frac{1}{\theta},$$

$$\frac{R}{R_0} - 1 > 0.$$

4. Wnioski

Z nierówności $k = \frac{\partial U_ł}{\partial I_ł} - \frac{\partial U}{\partial I} > 0$, która określa warunek stabilnej pracy łuku, wynika, że źródła zasilania łuku powinny mieć charakterystykę napięciowo-prądową, zbliżoną jak najbardziej do charakterystyki idealnego źródła prądu, tzn. $\frac{\partial U}{\partial I} \to \infty$. Zapewni to możliwość zasilania łuków o różnych typach charakterystyki statycznej.

Wraz ze wzrostem współczynnika stabilności k skróceniu ulega czas ustalania się prądu w przypadku jego zmiany wywołanej dowolnym zaburzeniem oraz wzrostem elastyczności łuku (możliwość zwiększenia jego długości). Zmianę długości łuku można określić wzorem

$$\Delta I_ł = \frac{\Delta L_ł}{k} \cdot \frac{\partial U_ł}{\partial L_ł}.$$

Warunki stabilności dynamicznej łuku mają postać:

$$\frac{1}{CR_0} > \frac{1}{\theta},$$

$$\frac{R}{R_0} - 1 > 0.$$

Stabilność dynamiczną wyładowania łukowego można zwiększyć poprzez:

a) zwiększanie wartości napięcia $U(\psi)$ źródła zasilania łuku w chwili zgaśnięcia łuku,
b) zwiększenie napięcia biegu jałowego,
c) zmniejszenie pojemności C w obwodzie zasilania łuku,
d) zwiększenie stałej czasowej,
e) zmniejszenie rezystancji R_0 łuku w chwili jego zgaśnięcia,
f) zmniejszenie długości łuku,
g) zwiększenie indukcyjności L w obwodzie zasilania łuku w chwili zgaśnięcia łuku,
h) wyeliminowanie lub zmniejszenie prądów wirowych.

Wszystkie te sposoby prowadzą w konsekwencji do zwiększenia prądu przedłukowego, dlatego wielkość tego prądu można uważać za obiektywną miarę stabilności dynamicznej łuku.

LITERATURA

[1] LESKOW G.U.: Elektriczeskaja swarocznaja duga. Moskwa.MaSzGIZ 1968.
[2] PATON B.E., LEBIEDIEW W.K.: Elektrooborudowanie dla dugowoj i szlakowoj swarki. Moskwa, Maszinostrojenie 166.

Wpłynęło do Redakcji w lutym 1980

Recenzent:
Doc. dr Henryk Mońka

СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Р е з ю м е

В статье выведены и проанализированы условия статической и динамической стабильности работы электрической дуги.

STATIC AND DYNAMIC STABILITY OF AN ELECTRIC ARC

S u m m a r y

Conditions for static and dynamic operation of an electric arc are derived and analysed in the paper.