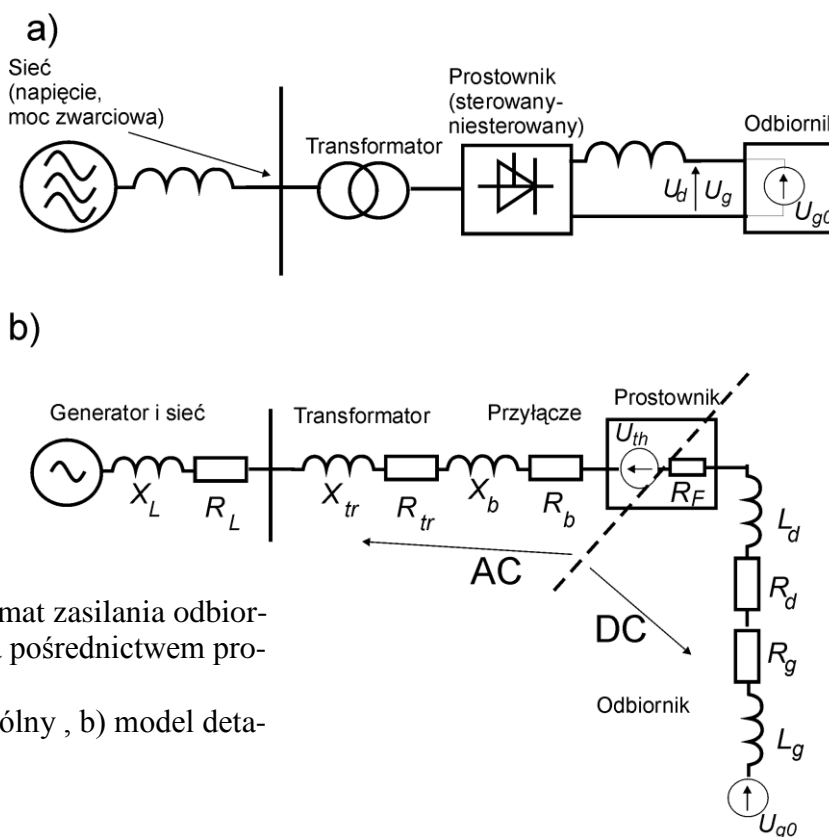


W5. Obliczanie napięcia transformatora sieciowego, dobór napięciowy łączników, łączenie szeregowo

5.1 Wyznaczanie koniecznego napięcia przemiennego – wyznaczenie przekładni transformatora

Celem obliczeń jest wyznaczenie przekładni napięciowej transformatora tak by przy minimalnym napięciu sieci i przy maksymalnych spadkach napięcia w przekształtniku z uwagi na maksymalny prąd obciążenia zapewnić wymaganą wartość napięcia na wyjściu przekształtnika U_d (lub przy ostrzejszych wymaganiach odpowiednią wartość napięcia wewnętrznego odbiornika U_{g0} – np. SEM silnika). Schemat obwodu zasilania poprzez prostownik i ekwiwalentny schemat zastępczy przedstawione są na rys.5.1



Rys.5. 1 Schemat zasilania odbiornika z sieci za pośrednictwem prostownika:

a) schemat ogólny , b) model detaliczny

Napięcie wejściowe odbiornika jest określone równaniem:

$$U_g = U_{g0} + R_g i_g + L_g \frac{di_g}{dt} \quad (5.1)$$

przy czym wygodnie jest stosować zapis tego równania w jednostkach względnych odniesionych do napięcia znamionowego U_{gN} i prądu znamionowego I_{gN} odbiornika.

$$\underline{u}_g = \underline{u}_{g0} + \underline{r}_g \underline{i}_g + \underline{l}_g \frac{d\underline{i}_g}{dt} \quad (5.2)$$

gdzie: $\underline{r}_g = R_g / (U_{gN} / I_{gN})$; $\underline{l}_g = L_g / (U_{gN} / I_{gN})$

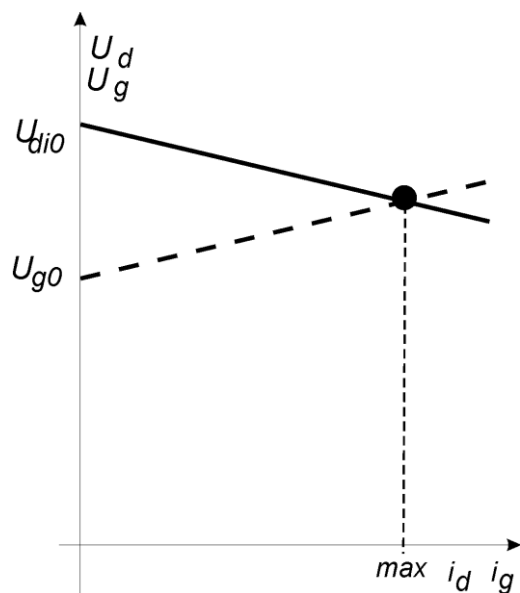
Podobnie określa się napięcie wyjściowe sterowanego prostownika z uwzględnieniem spadków napięć występujących w torze od generatora do zacisków wyjściowych:

$$U_d = \left(\frac{U_L}{U_{LN}} \right) U_{di0} \cos \alpha - D_C - (D_x + D_r) \left(\frac{I_d}{I_{dN}} \right) - D_{Ld} \frac{d(I_d / I_{dN})}{dt} \quad (5.3)$$

gdzie: D_C – bezwzględny spadek na zaworach [V]; D_X, D_R – bezwzględny spadek napięcia odpowiednio na indukcyjnościach obwodu napięcia przemiennego oraz na rezystancjach [V]; D_{Ld} – bezwzględny spadek napięcia proporcjonalny do szybkości zmian prądu [Vs]

W jednostkach względnych odniesionych do idealnego napięcia biegu jałowego U_{di0} równanie przyjmuje postać:

$$\underline{u}_d = \underline{u}_L \cos \alpha - d_C - (d_x + d_r) \underline{i}_d - d_{Ld} \frac{d\underline{i}_d}{dt} \quad (5.4)$$



Rys.5. 2 Charakterystyki napięciowo-prądowe przekształtnika i odbiornika

Dla stanu równowagi napięć w punkcie pracy odpowiadającym i_{dmax} obowiązuje

$$\underline{u}_g U_{gN} = \underline{u}_d U_{di0}$$

co obrazuje wykres na rys.5.2. odzwierciedlający możliwą pracę prostownikową oraz falownikową prostownika sterowanego

Na podstawie podanych wzorów można wyprowadzić ostateczne zależności na wymagane napięcie różniące się dla dwóch trybów pracy.

prostownikowej:

$$U_{di0(P)} = \frac{U_{gN}(\underline{u}_{g0} + \underline{r}_g \underline{i}_g + \underline{l}_g \frac{d\underline{i}_g}{dt})}{\underline{u}_L \cos \alpha_{\min} - d_C - (d_x + d_r) \underline{i}_d - d_{Ld} \frac{d\underline{i}_d}{dt}} \quad (5.5)$$

falownikowej:

$$U_{di0(F)} = \frac{-U_{gN}(\underline{u}_{g0} - \underline{r}_g \underline{i}_g + \underline{l}_g \frac{d\underline{i}_g}{dt})}{\underline{u}_L \cos \alpha_{\max} - d_C - (d_x + d_r) \underline{i}_d + d_{Ld} \frac{d\underline{i}_d}{dt}} \quad (5.6)$$

W powyższych wzorach oznaczono:

\underline{u}_L – względne minimalne napięcie sieci (Przy 10% możliwym spadku $\underline{u}_L = \sim 0.9$)

α_{\min} , α_{\max} - minimalny i maksymalny kąt wysterowania przy pracy prostownikowej i falownikowej odpowiednio. Jako wartość typową kąta α_{\min} przyjmuje się 5° el ($\cos \alpha_{\min} = 0.996$) natomiast α_{\max} wynika z warunku bezpiecznej pracy falownikowej i może wynosić $150\text{--}170^\circ$ el.

d_C - względny spadek napięcia na zaworach przekształtnika odniesiony do U_{di0}

Względny spadek napięcia na zaworach d_C należy obliczyć jako stosunek bezwzględnego spadku napięcia nU_F (suma bezwzględnego spadku napięcia na n -przewodzących szeregowo połączonych zaworach). Gdy wyznaczona wartość U_{di0} różni się znacznie od wyliczonej konieczne jest skorygowanie d_C i iteracja obliczeń

d_x - względny sumaryczny spadek na indukcyjnościach po stronie AC

d_r - względny sumaryczny spadek na rezystancjach po stronie AC i DC

W przypadku, gdy przekształtnik pracuje jako nawrotny(dwukierunkowy) należy wybrać napięcie wyższe z wyliczonych na podstawie wzorów 5.5 i 5.6

Do wyliczenia składników d_x i d_r mogą posłużyć wzory:

- od indukcyjności sieci zasilającej:

$$d_{xL} = k_{XL} \frac{P_{di0}}{Q} \quad (5.7)$$

gdzie : $P_{di0} = I_{dN} U_{di0}$ - moc obliczeniowa przekształtnika; Q – moc zwarciova sieci w miejscu przyłączenia przekształtnika; k_{XL} – współczynnik zależny od układu przekształtnika zgodnie z poniższą tabelką

Układ prostownika	2-pulsowy	3-pulsowy	6-pulsowy
k_{XL}	0,78	1,05	0,52

- **od indukcyjności rozproszenia transformatora:**

$$d_{Xtr} = k_{Xtr} e_{Xtr} \quad (5.8)$$

gdzie: e_{Xtr} – składowa indukcyjna napięcia zwarcia transformatora
 k_{Xtr} – współczynnik zależny od układu przekształtnika

Układ prostownika	2-pulsowy	3-pulsowy	6-pulsowy
k_{Xtr}	0,707	0,866	0,5

- **od indukcyjności przewodów przyłącza**

$$d_{Xb} = k_{Xb} \frac{L_{bw} f I_d}{U_{di0}} \quad (5.9)$$

gdzie: L_{bw} – indukcyjność 1 fazy przyłącza (indukcyjność na metr pomnożona przez długość przyłącza); k_{Xb} – współczynnik zależny od układu przekształtnika

Układ prostownika	2-pulsowy	2-pulsowy mostkowy	3-pulsowy	6-pulsowy
k_{Xb}	2	8	3	6

- **od rezystancji linii:**

$$d_{rL} = \frac{3I_L^2 R_L}{P_{di0}} \quad (5.10)$$

gdzie: R_L – rezystancja fazy przyłącza

- **od rezystancji uzwojeń transformatora:**

$$d_{Xtr} = k_{rtr} e_{rtr} \quad (5.11)$$

gdzie: e_{rtr} – składowa indukcyjna napięcia zwarcia transformatora
 k_{rtr} – współczynnik zależny od układu przekształtnika

Układ prostownika	2-pulsowy	3-pulsowy	6-pulsowy
k_{rtr}	1,11	1,5	1,05

W przypadku, gdy wymagania odnośnie szybkości narastania prądu są nieistotne we wzorach (5.5) i (5.6) można pominąć składniki dotyczące szybkości zmian prądu.

Napięcie U_{dio} wyznaczone na podstawie wzoru (5.5) dla prostownika lub (5.6) dla falownika stanowi podstawę do wykonania projektu transformatora zasilającego przekształtnik i odbiornik. W przypadku, gdy mamy do czynienia z przekształtnikiem sieciowym dwukierunkowym należy uwzględnić w obliczeniach wartość większą uzyskaną z obydwu wzorów.

Na podstawie wartości napięcia idealnego biegu jałowego można dla przewidywanego układu prostownika korzystając z teoretycznej wartości współczynnika prostowania k_{η} (wielkości wiążącej wartość średnią napięcia wyprostowanego z wartością skuteczną napięcia fazowego, strony wtórnej transformatora). W tabelicy podano wartości k_{η} dla najczęściej spotykanych konfiguracji przekształtników.

Układ prostownika	2-pulsowy Jedno i dwukierunkowy	3-pulsowy 6-puls. z dławikiem wyrównawczym	6-pulsowy dwukierunkowy	12-pulsowy szeregowy
k_{η}	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cong 0,9$	$\frac{3}{\pi\sqrt{2}} \cong 1,17$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cong 2,34$	$\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \cong 4,68$

Wyznaczone napięcie strony wtórnej transformatora stanowi podstawę do określenia napięcia roboczego jakie powinno być uwzględnione przy doborze napięciowym zaworów. Stanowi też ono podstawę do napięciowego

Przykład:

Napięcie wyznaczone z uwagi na parametry odbiornika $U_{dio} = 1420V_{RMS}$
 Należy określić przekładnię transformatora zasilanego z sieci 15 kV (wartość międzyfazowa) oraz wyznaczyć maksymalną wartość napięcia na tyrystorach w przypadku zastosowania jako przekształtnika mostka 3-fazowego:

Dla mostka trójfazowego :

$$U_{dio} = 2,34 U_2$$

Napięcie strony wtórnej (międzyfazowe)

$$U_{2L} = \frac{\sqrt{3}U_{di0}}{2,34} = 1051V$$

a zatem konieczna przekładnia transformatora

$$\eta_u = 15000/1051 = \mathbf{14,27}$$

Maksymalne znamionowe napięcie na zaworze to maksymalne napięcie międzyfazowe a zatem $U_{TWmax} = \sqrt{2} \cdot 1051 = \mathbf{1486V}$

5.2 Zasady doboru napięciowego łączników

Wytrzymałość napięciowa diod i tyrystorów, które współpracują z powszechnymi systemami zasilającymi – sieciami energetycznymi określana jest na podstawie wartości napięcia roboczego wyznaczanego jak wyżej. W systemie energetycznym można oczekiwać przebiegów, które z uwagi na stosowane aparaty ochronne (odgromniki) są ograniczone do wartości $2,5U_N$. Oznacza to, że przy doborze klasy napięciowej taki właśnie współczynnik bezpieczeństwa należy uwzględnić. W wielu przypadkach, przy specjalnym indywidualnym zabezpieczeniu można uzyskać współczynnik ograniczenia przebiegu poniżej 2.

Klasa napięciowa zaworu opisana przez wartość napięcia U_{RRM} (w tyrystorach także U_{DRM}) z zasady równe U_{RRM} wynika z zależności:

$$U_{RRM} \geq k_u k_s k_{uN} (U_{Wmax}/n) \quad (5.12)$$

gdzie: k_u – współczynnik bezpieczeństwa z uwagi na przebiegi w sieci (dobierany 1,6 – 2,5) k_s – współczynnik stosowany w przypadku gdy zawór utworzono przez szeregowe połączenie n elementów ($k_s = 1/n$); k_{uN} – normatywna zwyżka napięcia ponad nominalne (zwykle $k_{uN} = 1/n$)

W podanym przykładzie przy napięciu roboczym $U_{Wmax} = 1486V$ przy współczynniku bezpieczeństwa $k_u = 2$ należy zastosować tyrystory lub diody klasy napięciowej co najmniej 33 ($U_{RRM} \geq 3300V$)

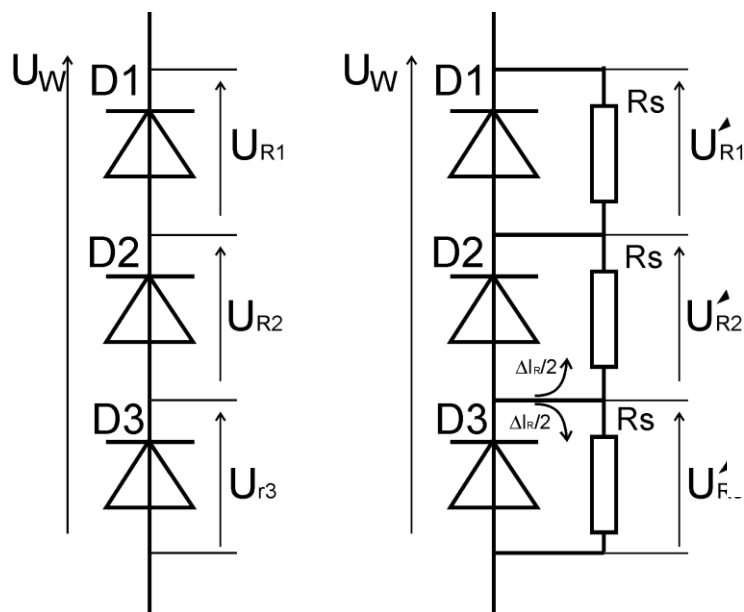
5.3 Łączenie szeregowe tyrystorów i diod

W przekształtnikach na napięcie przemienne powyżej 3kV występuje konieczność szeregowego łączenia diod i tyrystorów. Takie rozwiązanie wymaga by uzyskać równomierny rozkład napięć na szeregowo połączonych zaworach tej samej klasy napięciowej. Ponieważ przyczyną nierównomiernego rozkładu napięć jest rozrzut parametrów przyrządów półprzewodnikowych a selekcja tych parametrów jest niezwykle kosztowna konieczne jest zastosowanie środków pomocniczych dla wyrównania napięć. W pierwszym rzędzie zostanie rozpa-

trzony przypadek szeregowego połączenia 3 diod($n=3$) tak jak to przedstawia rys.3.

Napięcie, które występuje na wszystkich trzech diodach przy polaryzacji wstecznej dzieli się na poszczególne diody odwrotnie proporcjonalnie do wartości prądu wstecznego a zatem dla przyjętego do analizy przykładu obowiązuje.

$$\frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{I_{R2}}{I_{R1}}; \frac{U_{R2}}{U_{R3}} = \frac{I_{R3}}{I_{R2}}$$



Rys. 5. 3. Szeregowe połączenie diod bez rezystorów wyrównawczych i z takimi rezystorami

Dla przejrzystości i prostoty przykładu przyjęto że diody D1 i D2 mają taki sam prąd wsteczny ($I_{R1}=I_{R2}$) natomiast prąd diody D3 jest o ΔI_R mniejszy przy czym przyjęto, że $\Delta I_R=cI_{R1}=0,5I_{R1}$ (tzn. przyjęto $c=0,5$).

Napięcie które wystąpi na diodach o większym prądzie będzie równe

$$U_{R1}, U_{R2} = \frac{U_W(1-c)}{n-c(n-1)} \quad (5.13)$$

a w diodzie o prądzie mniejszym ($I_{R3}=(1-c)I_{R1}$)

$$U_{R3} = \frac{U_W}{n-c(n-1)} \quad (5.14)$$

Dla przykładowych danych($n=3, c=0.5$)

$$U_{R1}=U_{R2}=0.25 U_W; U_{R3}=0,5U_W$$

Aby uzyskać wyrównanie napięć tak by odchyłka in plus na diodzie o najmniejszym prądzie nie była większa niż założona wartość ΔU należy do stosu diod dołączyć rezystory wyrównawcze o równej rezystancji R_s jak na schemacie

z rysunku 5.3. Można bez trudu wykazać, że względna odchyłka napięcia (odniesiona do napięcia na zaworze przy równym rozkładzie napięć) jest określona wzorem:

$$\delta_u [\%] = \frac{n\Delta U}{U_w} = \frac{n\Delta I_R}{2U_w} R_S \quad (5.15)$$

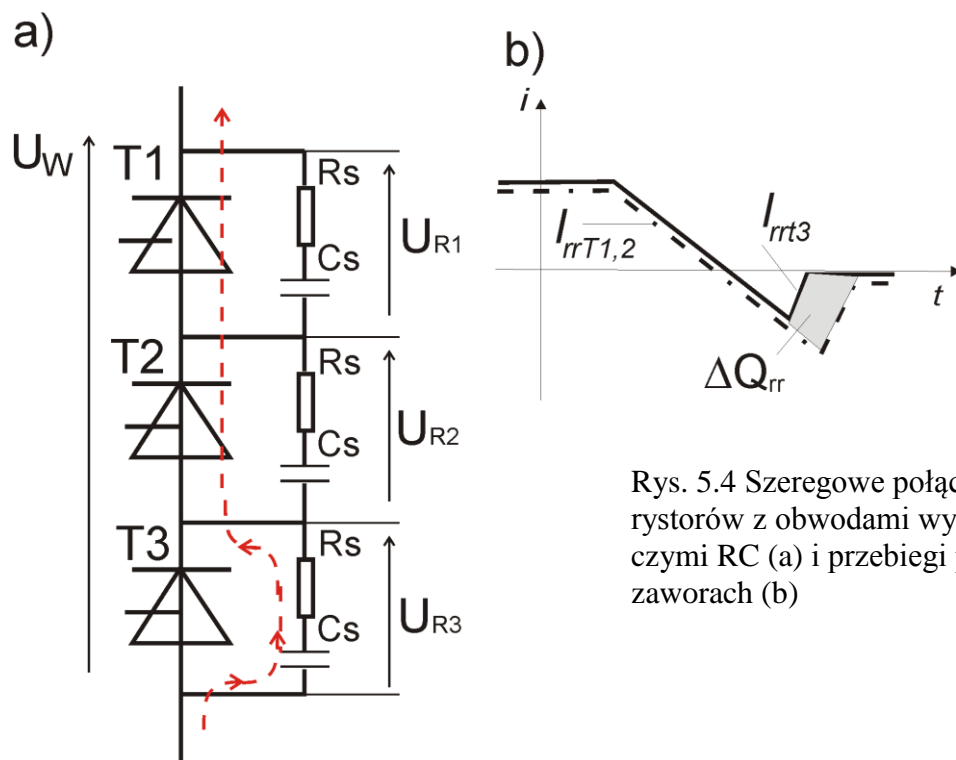
Stąd dla określonej wynikającej z rozrzutu parametrów odchyłki prądu $-\Delta I_R$ i założonej wartości δ_u można wyliczyć konieczną wartość rezystancji oporników wyrównawczych - R_S .

Tego samego rodzaju „drabinka” rezystorów wyrównawczych zapewni równomierny rozkład napięcia w przypadku stosu tyrystorów pozostających statycznie w stanie blokowania lub zaworowym.

W tyrystorach pracujących w typowych zastosowaniach podstawowy problem wymagający rozwiązania jest zapewnienie dostatecznie równomiernego rozkładu napięcia w stanach dynamicznych przy wyłączaniu i załączaniu tyrystorów w stosie. Oba stany dynamiczne zostaną rozpatrzone kolejno:

Wyrównanie napięć przy wyłączaniu (komutacji) tyrystorów:

Proces wyłączania stosu trzech tyrystorów połączonych szeregowo jest ilustrowany rysunkiem 5.4.



Rys. 5.4 Szeregowe połączenie tyrystorów z obwodami wyrównawczymi RC (a) i przebiegi prądu w zaworach (b)

W przypadku gdyby do tyristorów nie dołączono gałęzi zawierających kondensatory C_S to tyristor T3 o mniejszym ładunku przejściowym niż pozostałe (T1,T2) wyłączy pierwszy i przejmie całe napięcie U_w . Taki przypadek jest niedopuszczalny.

Zastosowanie gałęzi pomocniczych RC, w których zasadnicze znaczenie z punktu widzenia rozkładu napięcia mają kondensatory. Prąd przepływający przez kondensator w gałęzi dołączonej równolegle do T3 powoduje naładowanie kondensatora do napięcia ΔU_C proporcjonalnego do wartości ładunku ΔQ_{rr} który stanowi różnicę pomiędzy $Q_{rrT1,2}$ (ładunek przejściowy w tyristorach T1 i T2 – założony jako identyczny) i Q_{rrT3} .

$$\Delta U_C = \frac{\Delta Q_{rr}}{C_S} \quad (5.16)$$

Jak można wykazać po wyłączeniu tyristora T3 wystąpi na nim napięcie, które możemy wyznaczyć z ogólnego wzoru uwzględniając liczbę tyristorów $n=3$:

$$U_{R3} = \frac{1}{n}(U_w - (n-1)\Delta U_C) \quad (5.17)$$

a napięcie na każdym z dwóch pozostałych tyristorów

$$U_{R1}, U_{R2} = \frac{1}{n}(U_w + \Delta U_C) \quad (5.18)$$

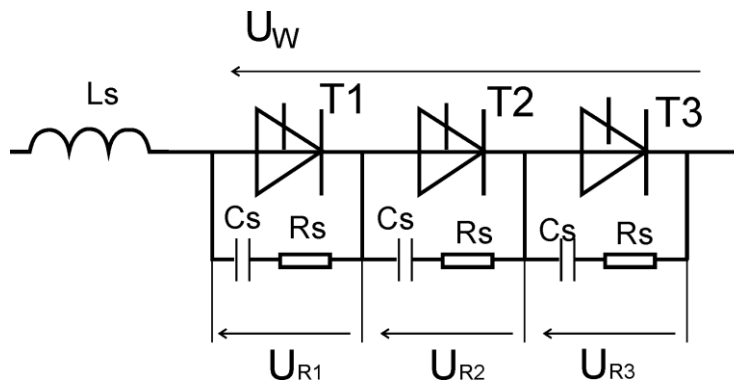
Jeżeli z powyższego wyprowadzi się zależność na względną odchyłkę napięcia

$$\delta_u[\%] = \frac{(n-1)\Delta Q_{rr}}{U_w C_S} \quad (5.19)$$

to na jej podstawie można wyliczyć wartość niezbędnej pojemności C_S w każdej gałęzi równolegle z tyristorem. Kondensator nie mogą być włączany bezpośrednio do tyristora, gdyż w momencie jego załączenia rozładowywałyby się impulsowo grożąc zniszczeniem tyristora. Stąd konieczność włączenia szeregowo z każdym kondensatorem rezystancji tak by ograniczyć prąd rozładowania. Wartość maksymalnego prądu rozładowania bywa podawana katalogowo (np. 40A) lub określana jako 1/3 prądu nominalnego

Wyrównanie napięć przy załączaniu tyrystorów:

Przyjmując, że stos szeregowo połączonych tyrystorów musi być wyposażony w zestaw obwodów RC trzeba w rozpatrywaniu procesu załączania uwzględnić schemat połączeń jak na rys. 5.5. prezentujący kompletny układ dla zapewnienia równomiernego rozkładu napięcia zarówno przy wyłączaniu jak i załączaniu tyrystorów



Rys. 5.5 Szeregowe połączenie tyrystorów z obwodami zapewniającymi wyrównanie napięć przy załączaniu

W rozpatrywanym układzie przy bliskiej zeru wartości indukcyjności ten z tyrystorów, który załącza z opóźnieniem Δt_g względem pozostałych dwóch zostanie poddany działaniu pełnego napięcia U_w . Jeżeli indukcyjność $L_S \neq 0$ to w opisywanej sytuacji na spóźniającym się tyrystorze wystąpi napięcie równe napięciu dołączonego do niego kondensatora C_S powiększone o spadek napięcia na rezystorze R_S wywołany przepływem prądu I_S narastającego w dławiku L_S pod wpływem napięcia $(n-1)U_w/n$.

Jeżeli wynikająca z występującego na dławiku napięcia stromość narastającego prądu di/dt jest równa $(n-1)U_w/L_S n$ to po czasie Δt_g (wynikającym z katalogowo określonego rozrzutu czasów załączania) prąd w rezystorze R_S narodzi się do wartości ΔU określonej wzorem

$$\Delta U = \frac{(n-1)U_w}{nL_S} \Delta t_g R_S \quad (5.20)$$

Z zależności w której uwzględniono założoną wartość względnego wzrostu napięcia δ_u na wolniejszym tyrystorze można wyznaczyć indukcyjności L_S

$$L_S = \frac{(n-1)\Delta t_g R_S}{\delta_u} \quad (5.21)$$

W przypadku gdy liczba tyrystorów n jest większa od trzech zwykle wartość czasu Δt_g może być zmniejszona do połowy swej katalogowej wartości (jest to konsekwencją uznania rozrzutu wartości dla poszczególnych egzemplarzy)