


1DE1501 APARATY ELEKTRYCZNE	 Instytut Elektroenergetyki Politechnika Warszawska
Zakład Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej	
dr inż. Tadeusz Daszczyński mgr inż. Szymon Stoczko dr hab. inż. Zbigniew Pochanke	

Badanie zjawiska napięcia powrotnego

1. Wstęp teoretyczny

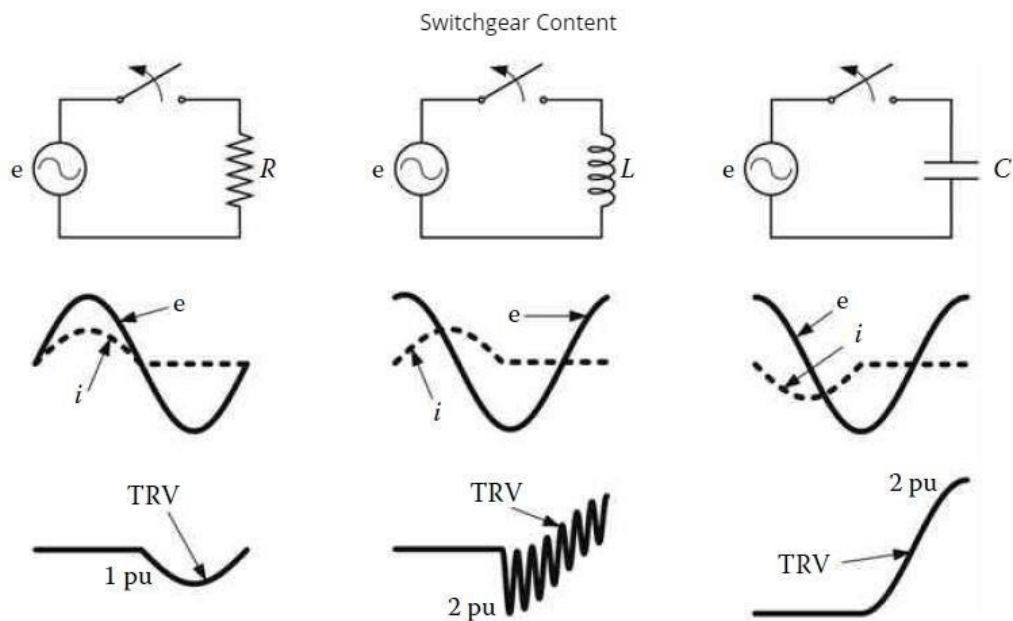
Podczas wyłączenia prądów przemiennych, zwłaszcza prądów zwarciovych, łuk elektryczny, który pojawia się z chwilą rozdzielenia styków, gaśnie przy przejściu prądu przez zero. Bezpośrednio po przejściu prądu przez zero wzrasta wytrzymałość międzystykowa, zwana również wytrzymałością zapłonową. Szybkość wzrostu tej wytrzymałości zależy od szybkości neutralizacji ładunków, które znajdują się w obszarze międzystykowym. Liczba tych ładunków zależy od prądu płynącego uprzednio w łuku. Jednocześnie stan nieustalony, wywołany w obwodzie wyłączeniem prądu wyłączeniowego, prowadzi do pojawienia się między rozchodzącymi się stykami łącznika napięcia zwanego napięciem powrotnym. Stany nieustalone spowodowane operacjami przełączania w układach liniowych można analizować za pomocą zasady superpozycji.

Ponieważ prąd płynący przez zaciski przełącznika po operacji będzie wynosił zero, wprowadzony prąd musi być równy prądowi, który płynął między zaciskami przełącznika przed operacją otwierania. Kiedy styki przełącznika zaczynają się otwierać, powstaje na nich napięcie przejściowe. To napięcie powrotne (ang. *Transient Recovery Voltage* – TRV) występuje bezpośrednio po przejściu przez zero prądu, a w rzeczywistych układach jego czas trwania jest rzędu milisekund.

Dobre zrozumienie zjawisk nieustalonych związanych z działaniem wyłączników w systemach elektroenergetycznych doprowadziło do ulepszenia praktyki testowania i zaowocowało bardziej niezawodnymi rozdzielnicami. Zalecane wartości charakterystyczne do symulacji TRV są ustalone w normach.

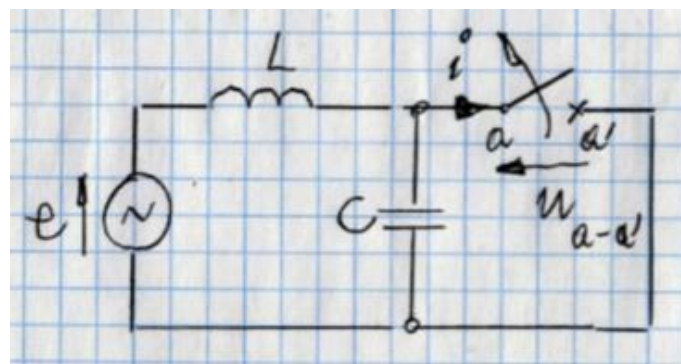
Na Rys. 1 pokazano TRV na zaciskach wyłącznika podczas przerywania prądu w bardzo prostych obwodach. Obserwuje się różne kształty fal, które pojawiają się w każdym przypadku.

Reprezentacja każdego obwodu jest taka, jak przedstawiono na Rys. 1, z wyjątkiem przerwania prądu indukcyjnego, ponieważ w tym przypadku prąd zerowy występuje, gdy napięcie na zaciskach cewki indukcyjnej jest maksymalne, a element pojemnościowy jest potrzebny do uwzględnienia uwięzionego ładunku. Ta ostatnia oscylacja jest spowodowana przenoszeniem energii między cewką a kondensatorem. Chociaż rzeczywiste systemy są znacznie bardziej złożone niż obwody analizowane powyżej, przypadki te pokazują, że przełączanie w normalnych warunkach pracy można sklasyfikować jako rezystancyjne, indukcyjne i pojemnościowe.



Rys. 1. Napięcia powrotne dla prostych układów elektrycznych

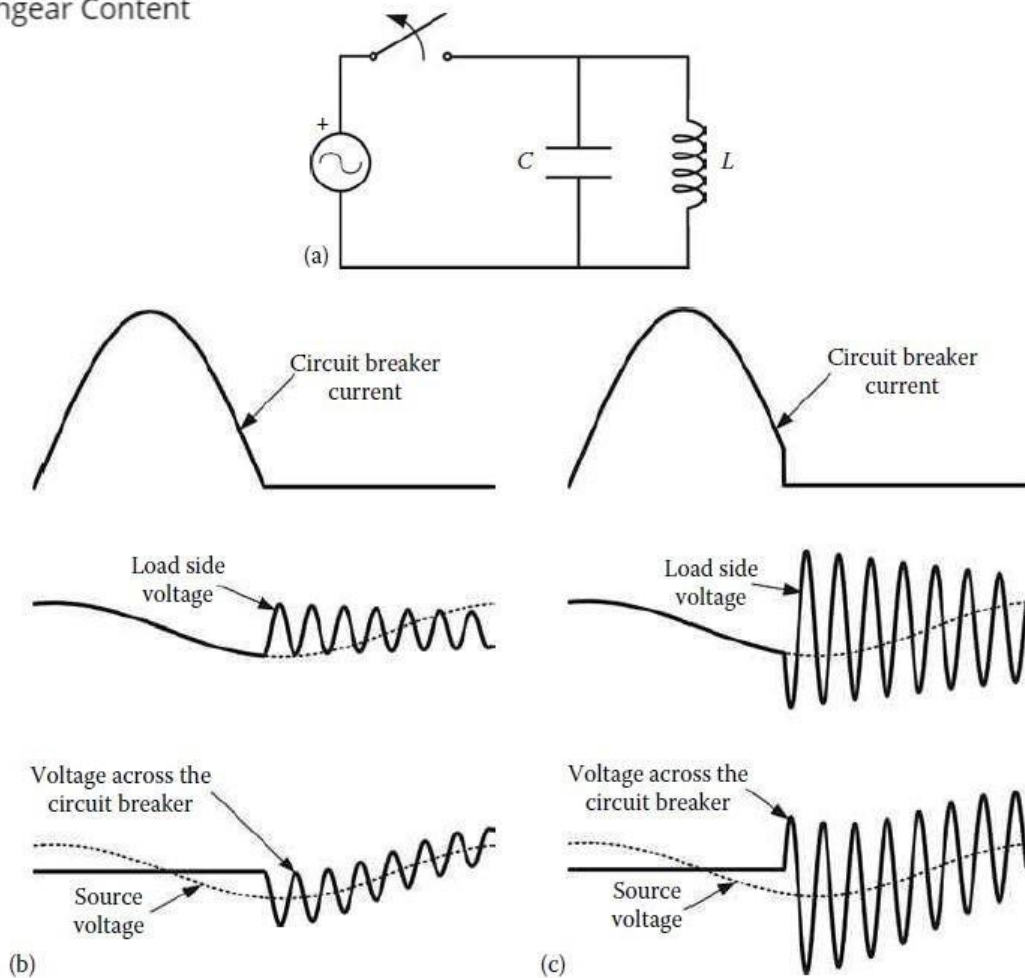
Przerwanie prądu zwarciego można wytłumaczyć najprostszym odpowiednikiem obwodu prądu przemiennego dla zwarcia w sieci jednofazowej, pokazanym na Rys. 2. Pojemność C reprezentuje pojemności błędzące sieci.



Rys. 2. Podstawowy obwód wyjaśniający wzrost przejściowego napięcia powrotnego

Na Rys. 3 przedstawiono porównanie napięcia po stronie obciążenia i TRV, które są generowane, gdy przerwanie łuku ma miejsce odpowiednio przy zerowym prądzie i przed zerowym prądem (zrywanie prądu). Z tego przykładu jasno wynika, że drugi przypadek jest poważniejszy. Znaczenie zrywania prądu można łatwo zrozumieć, zaniedbując wpływ strat po stronie obciążenia. Po przerwaniu przy zerowym prądzie energia zmagazynowana po stronie obciążenia jest energią zmagazynowaną na pojemności, której napięcie jest maksymalne.

Switchgear Content

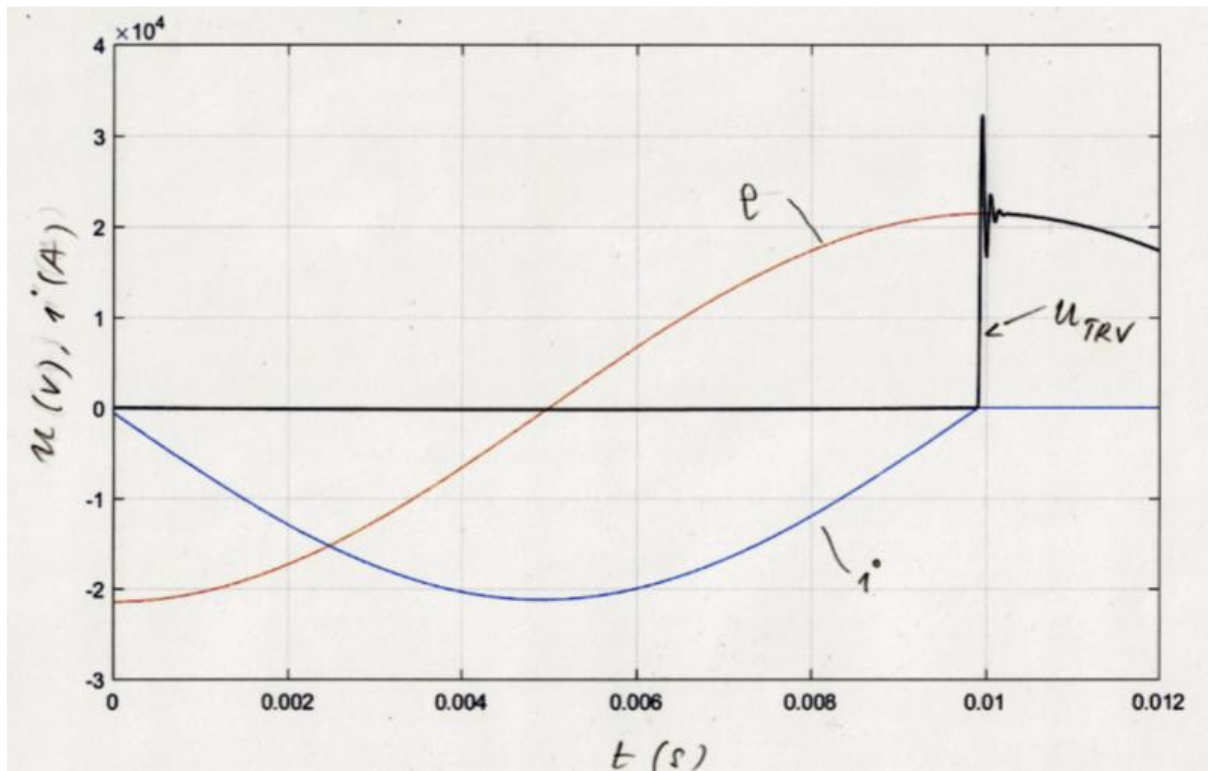


Rys. 3. Porównanie napięcia po stronie obciążenia i TRV, które są generowane, gdy przerwanie łuku ma miejsce przy zerze prądu i przed zerem prądu

Jeśli wyłącznik jest idealny - czyli w stanie zamkniętym jego reaktancja wynosi zero, a w stanie otwartym jego admitancja wynosi zero - prąd przerywany jest przy najbliższym (po rozwarciu styków) przejściu przez zero i na zaciskach wyłącznika pojawia się TRV, który składa się z dwóch składników:

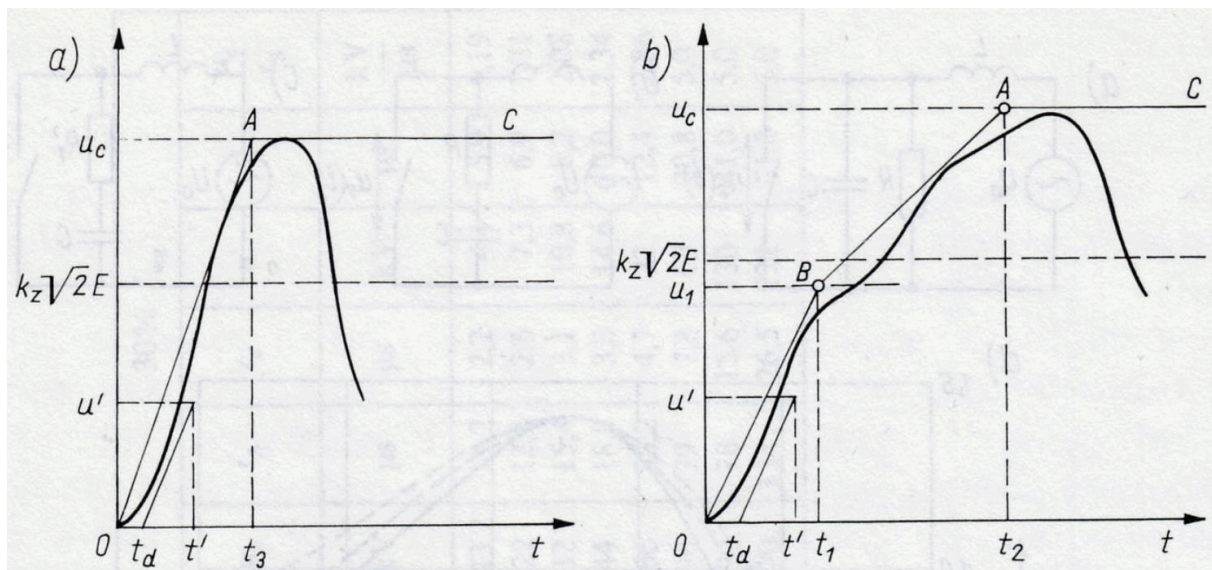
- podstawowy, 50 Hz będący napięciem źródła,

- przejściowy, reprezentujący proces przejściowy między dwoma stanami obwodu wymuszonymi przez dwie topologie obwodów:
 - zamknięty - gdy napięcie na pojemności wynosi zero,
 - otwarty - gdy to napięcie jest wymuszane przez źródło.



Rys. 4. Prądy i napięcia występujące podczas wyłączania zwarcia w obwodzie z Rys.2

W aspekcie fizycznym TRV można określić na podstawie jego charakterystyki częstotliwościowo-amplitudowej. Dla celów inżynierskich koncepcja obwiedni TRV okazała się adekwatna do charakteru wyłączania prądu polegającego na interakcji między łukiem komutacyjnym a siecią. Zasada działania obwiedni TRV jest pokazana na Rys. 5.



Rys. 5. Zasady tworzenia obwiedni TRV: a) obwiednia dwuparametrowa; b) obwiednia czteroparametrowa

TRV ma istotny wpływ na ostateczny efekt zerwania: jeśli jest zbyt mocne (zbyt duża stromość S_u - duża prędkość narastania lub zbyt wysoka wartość szczytu U_{TRVc}) w odniesieniu do wytrzymałości napięciowej zerwania styku wyłącznika, wyłączenie jest nieskuteczne.

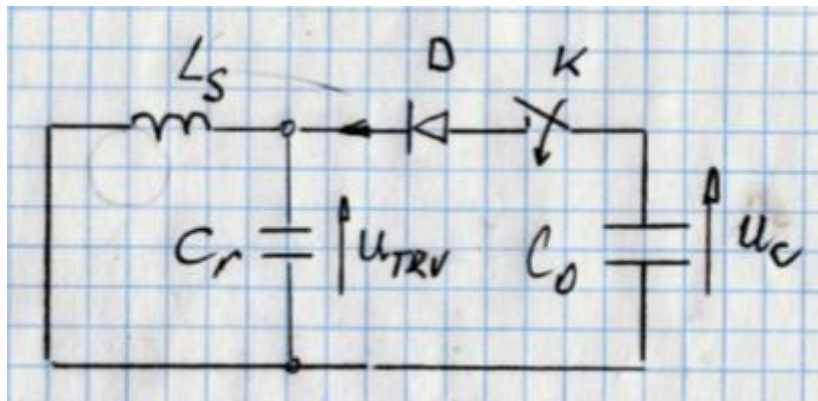
Poniższe eksperymenty pokazują, jak wartość prądu wyłączającego i parametry TRV określają wynik wyłączania. Wyłącznik reprezentowany jest przez elementarny model Mayra o zadanych parametrach. Celem eksperymentów jest znalezienie granic zdolności wyłączania symulowanego wyłącznika.

2. Eksperyment ze sterowaniem TRV

2.1. Przedmiot eksperymentu

Przebieg czasowy TRV - a więc jego sygnatura $[S_u U_{TRVc}]$ - jest specyficzny dla danego punktu sieci. Ale do testowania zdolności wyłączania wyłączników stosuje się sieci, w których TRV musi być kontrolowany w celu odtworzenia różnych warunków wyłączania.

Obwód zastępczy dla typowego układu testowania wyłączania przedstawiono na Rys. 6. W tabeli 1 przedstawiono parametry dwuparametrowego TRV.



Rys. 6. Obwód zastępczy dla typowej konfiguracji testu wyłączenia

Głównym celem jest ustalenie wartości L_s , C_r , R_r niezbędnych do wykonania testu zrywania dla wyłącznika o parametrach nominalnych:

- $U_r = 17,5$ kV - znamionowe napięcie pracy
- $I_{br} = 25$ kA - znamionowy prąd wyłączalny,
- przy prądzie 60% jego zdolności wyłączenia

Z tabeli 1 odczytać można parametry obwiedni: $t_3 = 31 \mu s$ $u_c = 32$ kV

$$S_u = \frac{u_c}{t_3}$$

$$U_{TRVc} = u_c$$

(1)

Tabela 1. Parametry obwiedni TRV dla standardowego badania zdolności wyłączenia

Upper switching voltage U_{up}	100% x I_{wg}						60% x I_{wg}						30% x I_{wg}					
	u_c	t_3	t_d	u'	t'	u_c/t_3	u_c	t_3	t_d	u'	t'	u_c/t_3	u_c	t_3	t_d	u'	t'	u_c/t_3
	kV	μs	μs	kV	μs	kV/ μs	kV	μs	μs	kV	μs	kV/ μs	kV	μs	μs	kV	μs	kV/ μs
7,2	12,4	52,0	7,8	4,1	25,0	0,238	13,2	22,2	4,5	4,4	11,6	0,594	13,2	11,2	2,2	4,4	5,9	1,190
12	20,6	60,0	9,0	6,9	29,0	0,345	22,0	25,5	5,1	7,3	13,8	0,857	22,0	12,8	2,6	7,3	6,9	1,710
17,5	30,0	72,0	10,0	13,0	35,0	0,415	32,0	31,0	6,2	10,8	16,4	1,040	32,0	15,4	3,1	10,8	8,2	2,080
24	41,0	88,0	13,2	13,8	42,5	0,470	44,0	37,5	7,5	14,6	20,2	1,170	44,0	18,8	3,8	14,6	10,0	2,340
36	62,0	108,0	16,2	20,6	52,0	0,570	66,0	46,5	9,3	22,0	24,6	1,430	66,0	23,2	4,7	22,0	12,4	2,860
123	182,0	182,0	19,6	65,0	85,0	1,0	196,0	98,0	19,6	65,0	52,0	2,0	196,0	39,0	7,8	65,0	20,8	5,0
245	365,0	365,0	39,0	130,0	170,0	1,0	390,0	196,0	32,5	130,0	98,0	2,0	390,0	78,0	15,6	130,0	41,0	5,0
420	620,0	620,0	66,5	222,0	290,0	1,0	670,0	335,0	56,0	222,0	168,0	2,0	670,0	134,0	26,5	222,0	71,0	5,0

Z trv_brk_cont.m można obliczyć:

- indukcyjność obwodu (skrypt Matlab)

$$U_n = 17.5e3;$$

$$E_{fm} = 1.5 * \text{sqrt}(2/3) * U_n;$$

$$I_w = 0.6 * 25e3;$$

$$L_s = (E_{fm}/\sqrt{2})/I_w/314; \% 7.4e-3$$

$$R_s = L_s/0.2; \% \textit{average value of the network time const. 0.2 s}$$

- wstępne przybliżenie gałęzi równoległej (skrypt Matlab)

$$t_3 = 31e-6;$$

$$f_0 = 1/t_3/3;$$

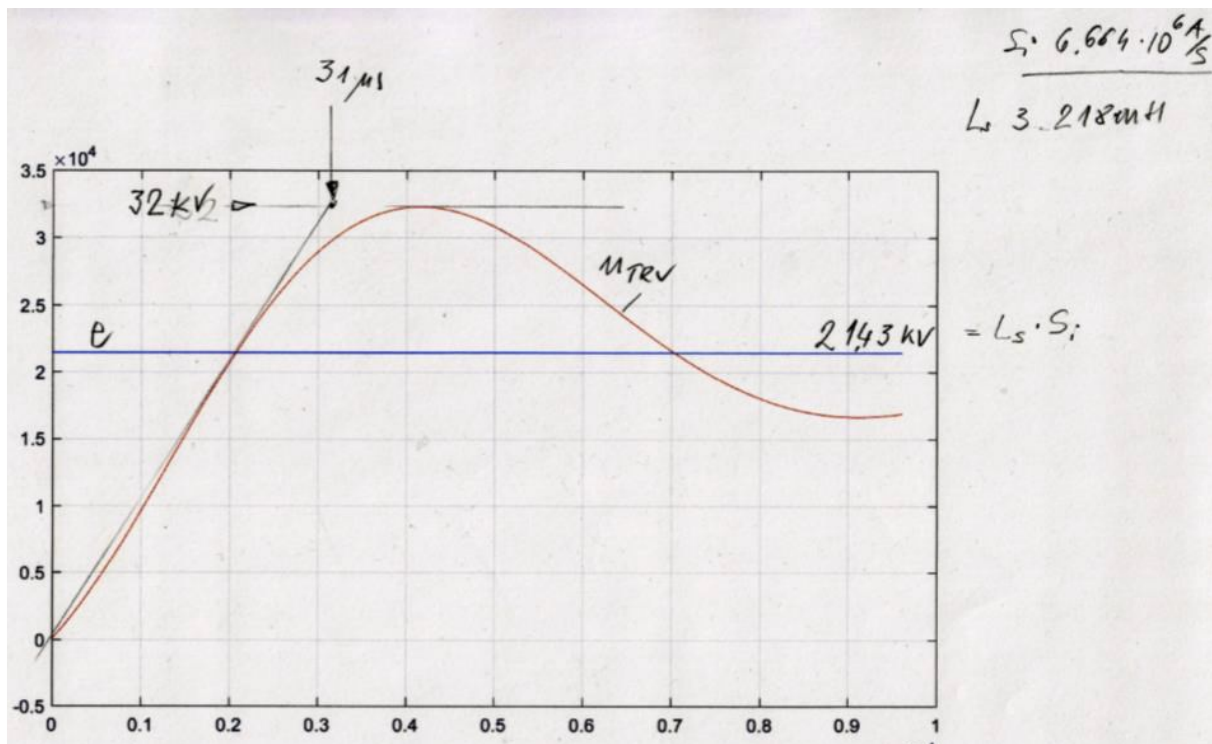
$$L_s C_r = (1/(2 * \pi * f_0))^2;$$

$$C_r = L_s C_r / L_s;$$

$$R_r = 0.5 * \sqrt{L_s / C_r};$$

2.2. Eksperyment

Należy wykonać symulację - użyj skryptu *trv_brk_con.m*. Na wykresie TRV narysuj obwiednię, sprawdź jej parametry - Rys. 7.



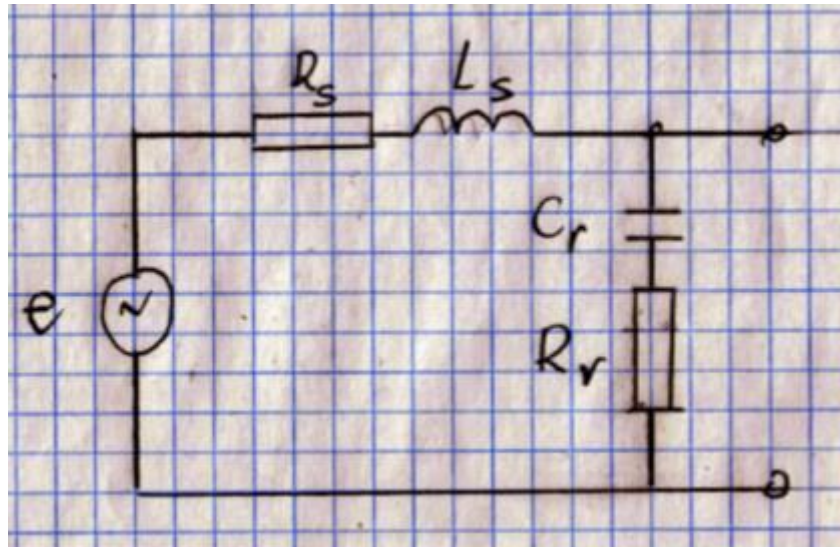
Rys. 7. Przebieg TRV uzyskany w symulacji

TRV w rzeczywistych testach nie może być używany do sprawdzania trudności wyłączania obwodu testowego ze względu na wpływ łuku elektrycznego. Zamiast tej metody istnieje inne podejście do ujawnienia tzw. właściwego (oczekiwanego, niezainfekowanego) TRV. Polega ono na tym, że interesuje nas struktura czasowa przejściowej części napięcia powrotnego: w czasie t_3 oraz współczynnik szczytu:

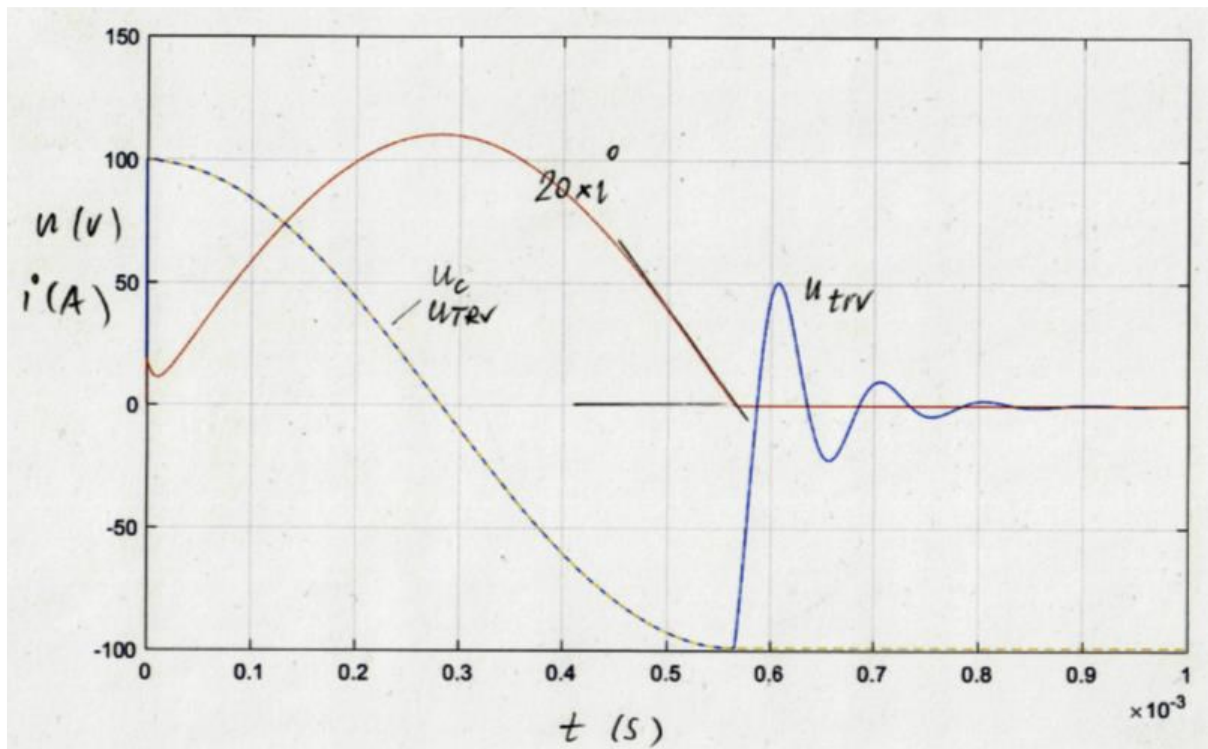
$$k_c = \frac{u_c}{U_B} \quad (2)$$

gdzie U_B jest napięciem bazowym TRV indukowanym przez źródło.

Parametry te można ujawnić wprowadzając do sieci ze zwartymi źródłami napięcia impuls prądowy o postaci półsinusoidalnej, jak pokazano na rys. 8. Jest to tzw. „metoda wstrzykiwania prądu”.



Rys. 8. Konfiguracja do wzbudzenia TRV przez wstrzyknięcie prądu



Rys. 9. Prąd i napięcie przy wzbudzeniu TRV przez wstrzyknięcie prądu

Dalej należy wykonać symulację - skrypt *trv_ind_cont.m*. Na wykresie TRV należy narysować obwiednię i sprawdzić jej parametry - rys. 7.

3. Program badań

Zespoły laboratoryjne powinny przygotować raport techniczny zawierający:

- a. Wprowadzenie teoretyczne - co najmniej 5 artykułów z ostatnich 10 lat na ten temat
- b. Opis i analiza modeli symulacyjnych w Simulink i Matlab.
- c. Porównanie symulacji.
- d. Znaleźć współczynnik proporcjonalności.
- e. Opisać proces TRV.
- f. Podsumowanie i sensowne wnioski.