

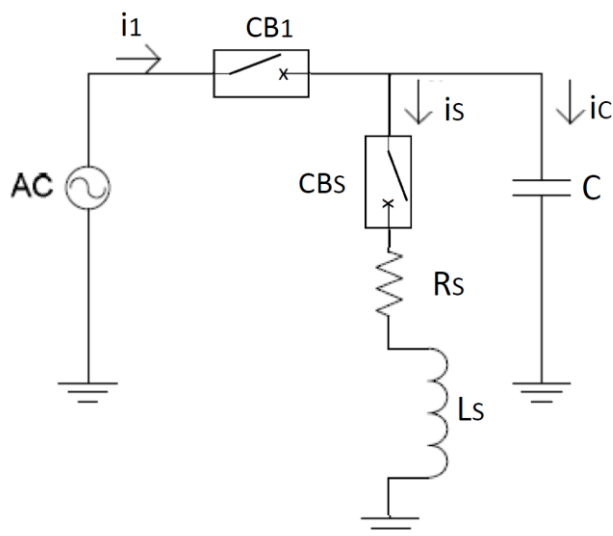
PROBLEMATYKA ZWIĄZANA W WYŁĄCZANIEM SKRAJNIE ASYMETRYCZNYCH PRĄDÓW PRZEZ WYŁĄCZNIK , ZABEZPIECZAJĄCY KABEL SKOMPENSOWANY DŁAWIKIEM DLA WYPROWADZENIA MOCY Z MORSKIEJ FARMY WIATROWEJ .

WSTĘP

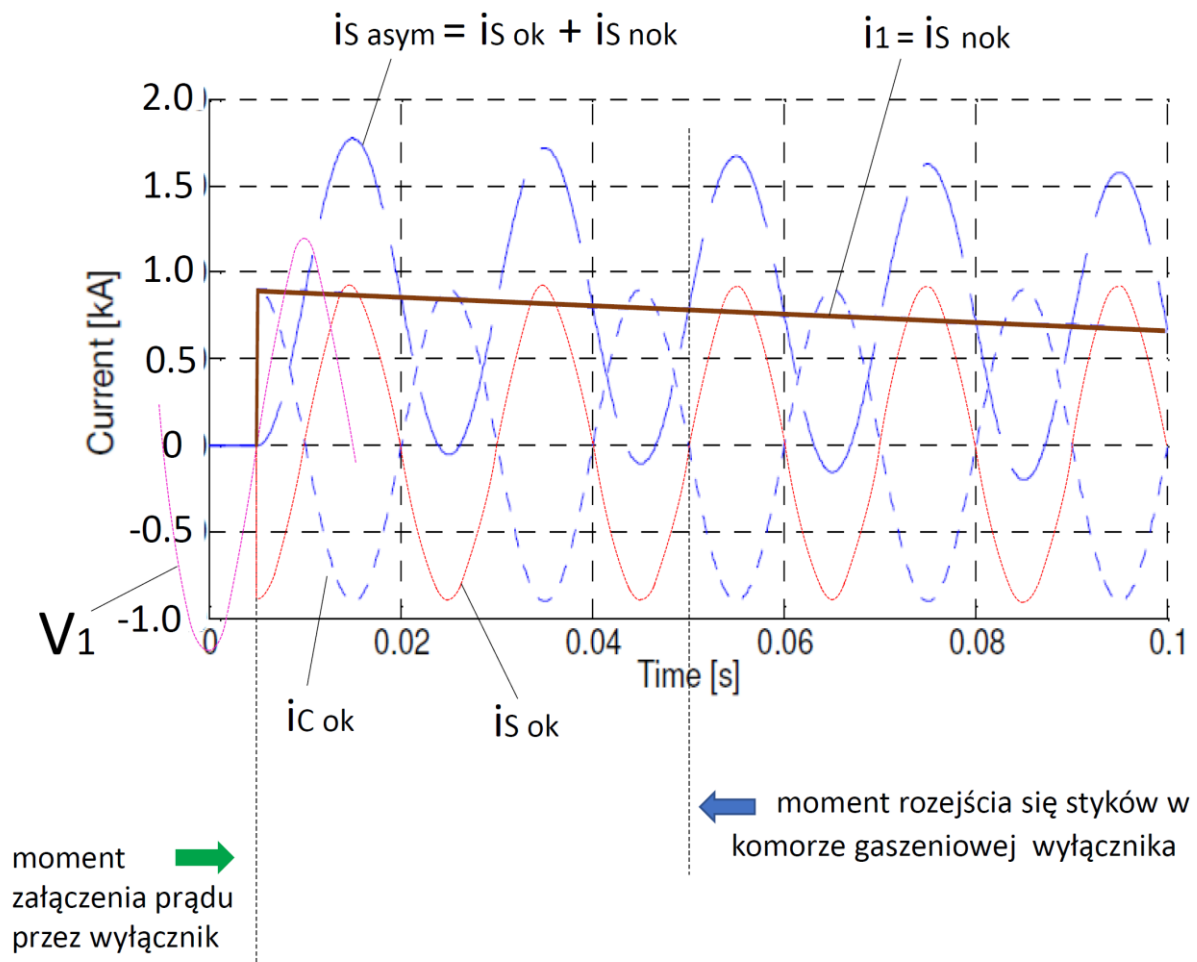
Eksploatacja stacji energetycznych na napięcia 220 - 400 kV potwierdza przypadki niewyłączenia przez wyłączniki mocy (np. z prądem wyłączalnym $I_{sc}=50$ kA) względnie małego prądu , tzn. : amplituda prądu załączeniowego poniżej $1,5$ kA_{peak} , a prąd ustalony na poziomie 300-600 A_{eff} (prąd znamionowy wyłącznika $I_n=3150$ A_{eff}) , skutkujące trwałym uszkodzeniem tego aparatu ! , co prowadziło do unieruchomienia części stacji rozdzielczej dużej mocy. Przyczyną nieskutecznego wyłączenia tak małego prądu dławika kompensacyjnego był udział składowej nieokresowej i nok (składowa DC) prądu płynącego przez wyłącznik , tzn. i nok o wartości znacznie przekraczającej wartość amplitudy składowej okresowej i okr prądu (składowa AC). W rezultacie po otwarciu wyłącznika prąd DC podtrzymywał łuk elektryczny w komorze gaszeniowej wyłącznika , i wyłącznik bez przejścia prądu przez zero nie był w stanie wyłączyć tego względnie małego prądu. W referacie będzie omówione w/w zjawisko , w oparciu przebiegi czasowe prądu płynącego przez wyłącznik w najniekorzystniejszych sytuacjach , tzn. : jednoczesnego załączenia długiego - nieobciążonego kabla , skompensowanego dławikiem - w pobliżu zera napięcia zasilania , oraz w sytuacji częściowej kompensacji strat w pojemności względnie długiego kabla (powyżej 50 km) np. morskiego kabla „eksportowego” , zastosowanego dla wyprowadzenia mocy z Morskiej Farmy Wiatrowej. Sposób rozwiązania tego problemu zostanie omówiony w oparciu o zastosowanie wyłącznika GIS - w wykonaniu specjalnym , tzn. z komorą łączeniową pomocniczą , zintegrowaną z rezystorem PIR (Pre-Insertion-Resistor) , czyli rezystorem załączającym , przez który płynie prąd w początkowej fazie załączania wyłącznika (ok. 10 ms) , a po tym czasie prąd płynie już tylko przez układ komorę pomocniczą w stanie załączenia , bocznikująca rezystor PIR.

1. Przyczyna generacji prądów o niewielkiej wartości , problematycznych dla wyłączenia przez wyłączniki mocy w przypadku długich , niedociążonych kabli - skompensowanych dławikami.

Dla sporządzenia niżej przedstawionych , poglądowych przebiegów czasowych prądów przyjęto uproszczony schemat RLC (patrz RYS. 1) przedstawiający podłączenie dławika kompensacyjnego (L_s ; R_s) do skupionej pojemności C kabla . W dalszych rozważaniach będzie wyjaśniona przyczyna umieszczenia dwóch wyłączników CB1 oraz CB2 na poniższym schemacie.



RYS. 1. Uproszczony schemat : nieobciążony kabel WN o pojemności C z kompensacją strat poprzez podłączenie dławika kompensacyjnego R_s ; L_s .



RYS. 2. Przebiegi czasowe prądów : załączenie nieobciążonego kabla w zerze napięcia zasilania , przy 100% kompensacji strat mocy biernej przez dławik kompensacyjny.

V_1 - napięcie zasilania

$i_c \text{ ok}$ - prąd pojemnościowy nieobciążonego kabla

$i_s \text{ ok}$ - składowa okresowa prądu dławika

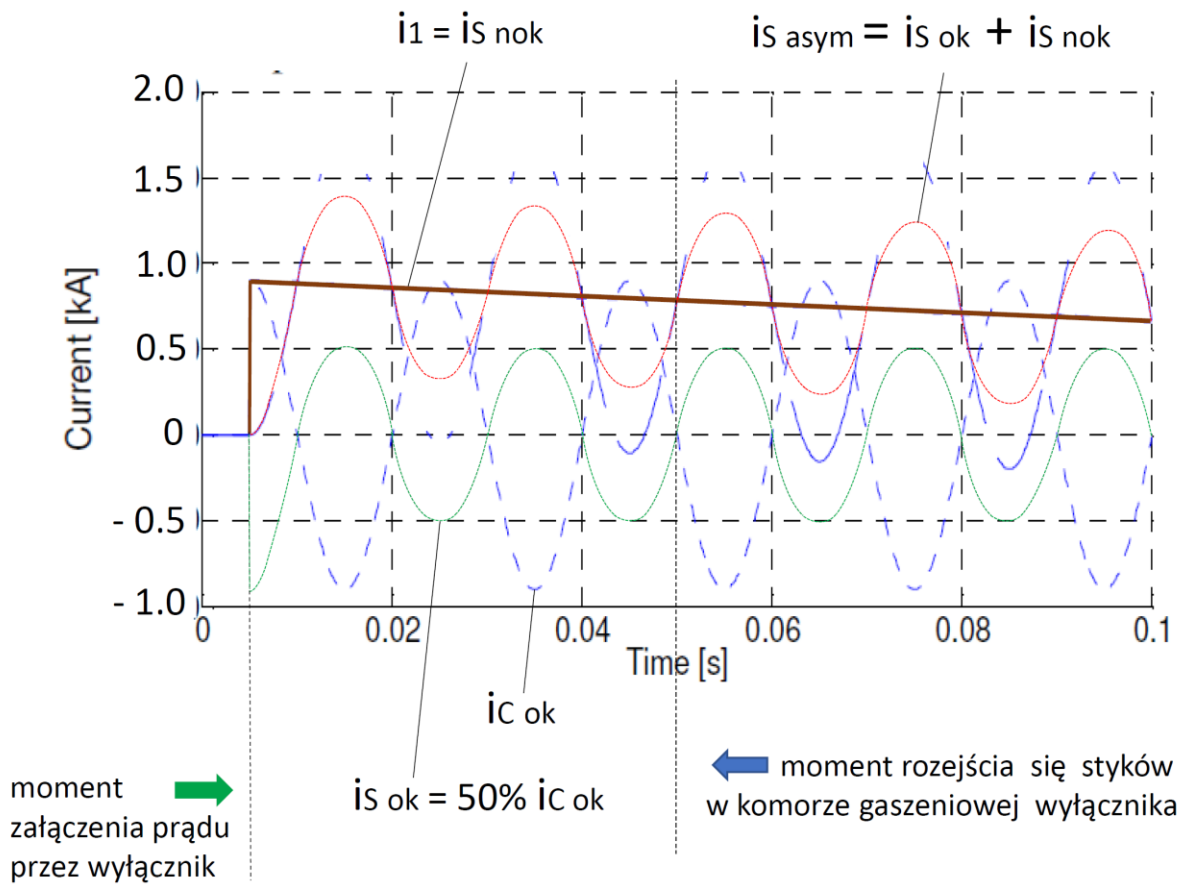
$i_s \text{ nok}$ - składowa nieokresowa (DC) prądu dławika

$i_s \text{ asym} = i_s \text{ ok} + i_s \text{ nok}$ - prąd asymetryczny dławika , płynący przez wyłącznik CBS (patrz RYS. 1)

$i_1 = i_s \text{ nok}$ - prąd od strony zasilania , płynący przez wyłącznik CB1 (patrz RYS. 1)

W przypadku 100% kompensacji strat na moc bierną kabla , poprzez przyłączenia dławika kompensacyjnego , pądy symetryczne tych elementów obwodu mogą być praktycznie w przeciwfazie . Na RYS. 2 pokazano taki przypadek tzn. przebiegi prądowe w przeciwfazie , z identycznymi amplitudami tych prądów , i wówczas po załączeniu przez wyłącznik CB1 (patrz RYS. 1) skompensowanego i nieobciążonego kabla w zerze napięcia zasilania V_1 (patrz RYS. 2) , popłynie przez ten aparat prąd stały $i_s \text{ nok}$ o względnie niewielkiej wartości , ale przy braku przejścia tego prądu przez zero , wyłącznik CB1 (patrz RYS. 1) nie będzie w stanie go wyłączyć (!) w akceptowalym przedziale czasowym , tzn. do 100 ms (patrz RYS. 2). Problematicznym może się także okazać skuteczne wyłączenie prądu asymetrycznego dławika $i_s \text{ asym} = i_s \text{ ok} + i_s \text{ nok}$ przez CBS (patrz RYS. 1) , z powodu bardzo dużej asymetrii tego prądu w momencie rozejścia się styków wyłącznika CBS (patrz RYS. 2) po czasie 45 ms , liczonym od momentu załączenia prądu przez CBS , do momentu rozejścia się jego styków podczas operacji „WYŁ” , na który składa się : 15 ms - czas własny zabezpieczenia 30 ms - czas własny wyłącznika . Wyłączniki stosowane w GIS to szybkie aparaty łączeniowe , i przyjęty czas własny na „WYŁ” : 30 ms , jest w pełni realny.

W przypadku częściowo skompensowanych strat mocy biernej w nieobciążonym kablu , np. w wysokości 50% (patrz RYS. 3) mamy do czynienia z jeszcze gorszą sytuacją , jak chodzi o skuteczne wyłączenie prądu przez wyłączniki CB1 oraz CBS (patrz RYS. 1) , ponieważ prąd asymetryczny dławika : $i_s \text{ asym} = i_s \text{ ok}$ (50% $i_c \text{ ok}$) + $i_s \text{ nok}$, to prąd o asymetrii znacznie przekraczającej 100% - bez przejścia przez zero w przedziale czasowym do 0 - 100 ms (patrz RYS. 3) , i takiego względnie niewielkiego prądu DC wyłącznik CBS (patrz RYS. 1) nie jest w stanie wyłączyć (!). W rezultacie obydwu wyłączniki mocy, czyli CB1 oraz CBS nie będą w stanie wyłączyć swoich , względnie niewielkich prądów DC (!).



RYS. 3. Przebiegi czasowe prądów : załączenie nieobciążonego kabla w zerze napięcia zasilania , przy 100% kompensacji strat mocy biernej przez dławik kompensacyjny.

$i_{c\text{ ok}}$ - prąd pojemnościowy nieobciążonego kabla

$i_{s\text{ ok}}$ - składowa okresowa prądu dławika

$i_{s\text{ nok}}$ - składowa nieokresowa (DC) prądu dławika

$i_{s\text{ asym}} = i_{s\text{ ok}} (50\% i_{c\text{ ok}}) + i_{s\text{ nok}}$ - prąd asymetryczny dławika , płynący przez wyłącznik CBS (patrz FIG. 1)

$i_1 = i_{s\text{ nok}}$ - prąd od strony zasilania , płynący przez wyłącznik CB1 (patrz FIG. 1)

2. Zastosowanie rezystora załączającego w wykonaniu specjalnym wyłącznika , jako jeden ze sposobów skutecznego wyłączenia prądów długich , niedociążonych kabli WN - skompensowanych dławikami.

W stacjach energetycznych dużych mocy są stosowane wyłączniki napowietrzne oraz wyłączniki w polach GIS w wykonaniu specjalnym , gdzie rezystor załączający PIR (Pre-Insertion-Resistor) wraz z własną komorą łączeniową (połączenie równoległe tych elementów) , jest konstrukcyjnie zintegrowany z komorą gaszeniową główną wyłącznika patrz : RYS. 4 ; RYS. 5 oraz RYS. 6. Zasadę współdziałania komory głównej z zespołem komora pomocnicza + PIR opisano poniżej :

ZAŁĄCZANIE WYŁĄCZNIKA

Faza 1 : załączanie komory głównej (patrz RYS. 5) przebiega przy dużej prędkości styków, załączanie komory pomocniczej PIR z w początkowej fazie ruchu ze znacznie mniejszą prędkością styków , dzięki specjalnej konstrukcji połączenia mechanicznego , z elementem ruchomym głównej komory gaszeniowej wyłącznika (patrz RYS. 6) ;

Faza 2 : zetknięcie się styków opalnych w komorze głównej wyłącznika (patrz RYS. 5) , komora rezystora nie jeszcze nie załączona , rezystor PIR przewodzi prąd (zwykle ok. 10 ms) ;

Faza 3 : w momencie zetknięcia się styków w komorze pomocniczej prąd w PIR praktycznie przestaje płynąć , gdyż komora pomocnicza zwarta PIR , ale styki w komorze głównej wyłącznika jeszcze nie zakończyły ruchu ;

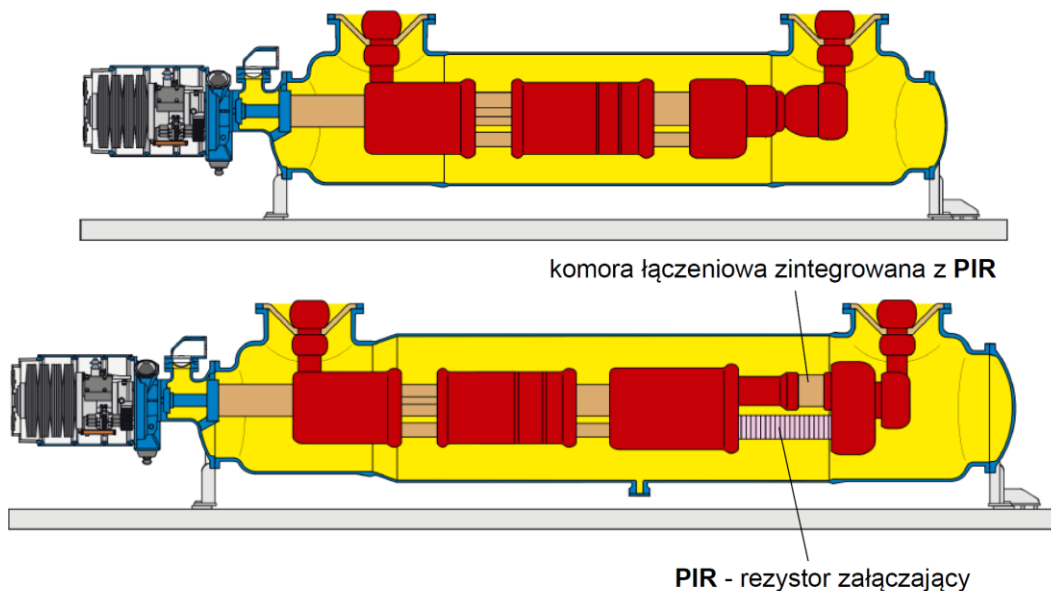
Faza 4 : w momencie zakończenia ruchu styków w komorze głównej wyłącznika , ustaje ruch styków w komorze pomocniczej (patrz RYS. 6). W stanie załączenia wyłącznika oporność toru prądowego komory pomocniczej to rząd mikroomów , a w przypadku GIS typu ELK-3/420 lub ELK-3/550 (patrz RYS. 4) jest stosowany rezystor PIR o oporności $R_p = 415 \Omega$, zatem prąd w rezystorze jest bliski zeru .

WYŁĄCZANIE WYŁĄCZNIKA

Faza 5 : otwieraniu wyłącznika towarzyszy szybkie rozchodzenie się styków w komorze głównej (patrz RYS. 4) , ale w tym czasie jest obserwowany powolny ruch styków w komorze pomocniczej bocznikującej PIR , która przewodzi prąd wyłącznika , a przez PIR prąd nie płynie . W momencie utraty styczności w zestyku opalnym głównej komory wyłącznika , komora pomocnicza pozostaje w stanie załączenia , i PIR nadal nie przewodzi prądu .

Faza 6 : przy prawie całkowitym odstępnie izolacyjnym między stykami w komorze głównej wyłącznika (patrz RYS. 4) , następuje utrata styczności w zestyku komory pomocniczej (patrz RYS. 6), ale łuk elektryczny w tej komorze się nie zapala , ruch styków w komorze głównej wyłącznika nie ustaje ;

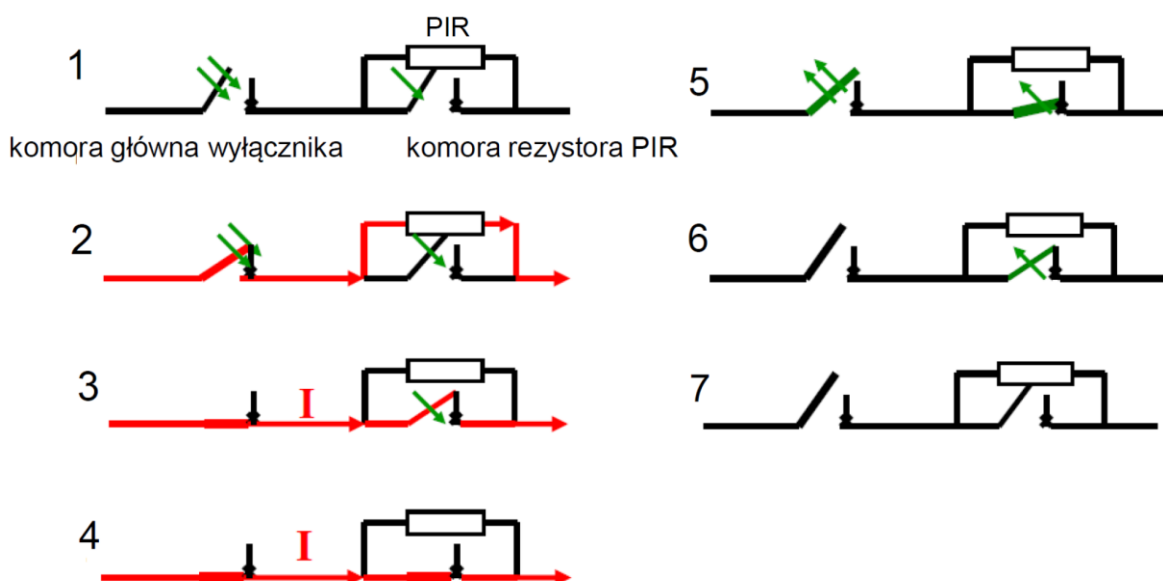
Faza 7 : ruch styków w komorze głównej zakończony , osiągnięty pełny odstęp izolacyjny między stykami w komorze głównej wyłącznika , oraz pomocniczej , zintegrowanej z PIR (patrz RYS. 4 oraz RYS. 6).



Bieguny wyłącznika stosowanego w GIS typu ELK-3/420 oraz ELK-3/420

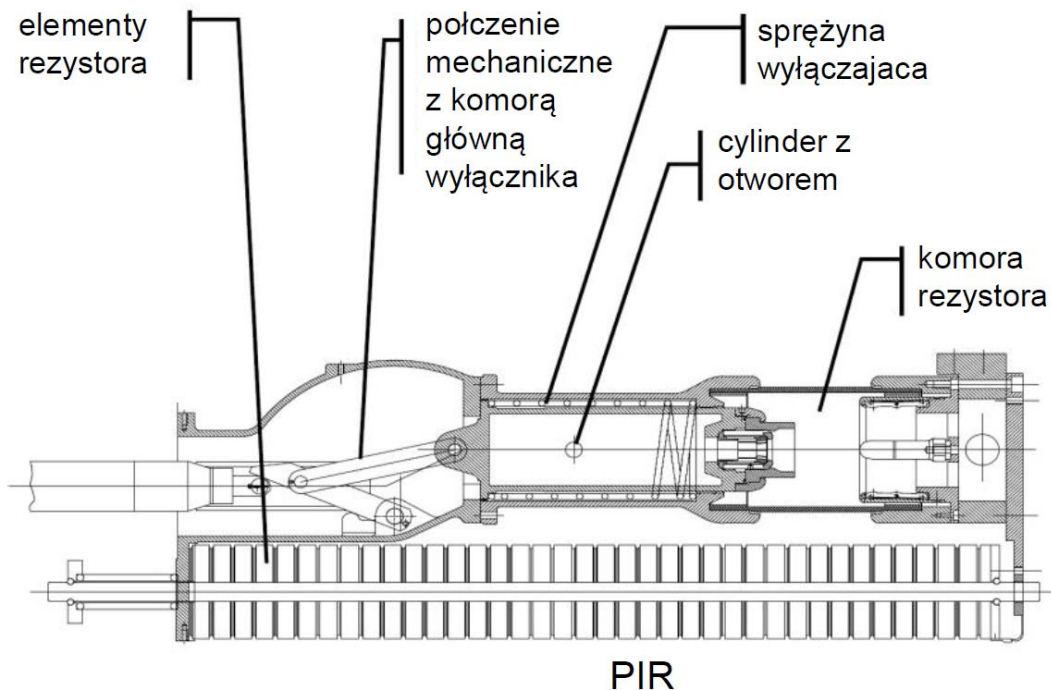
- a) standargowy
- b) z rezystorem PIR ($R_p = 415 \Omega$)

RYS. 4. Rezystor PIR równolegle podłączony do komory pomocniczej - komponenty zintegrowane z komorą łączeniową główną wyłącznika stosowanego w GIS typu ELK-3/420 oraz ELK-3/550 , produkcji ABB.

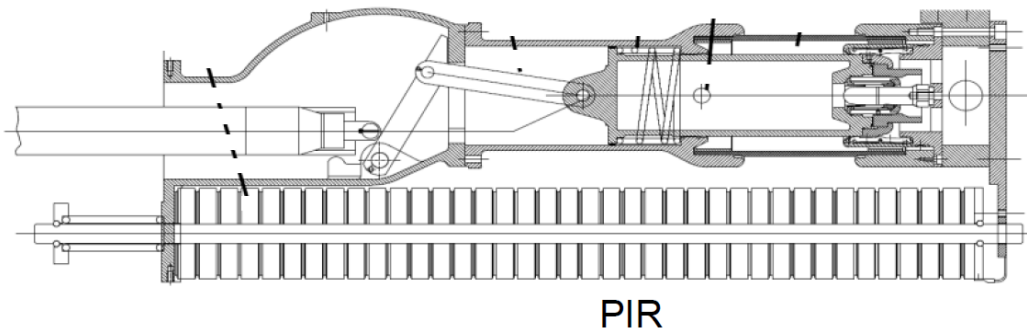


RYS. 5. Współdziałanie komory głównej wyłącznika z zespołem rezystora załączającego PIR , złożonego z rezystora PIR oraz równolegle podłączonej do niego pomocniczej komory łączeniowej.

komora wspomagająca PIR w pozycji “WYŁĄCZ” , PIR
przewodzi prąd

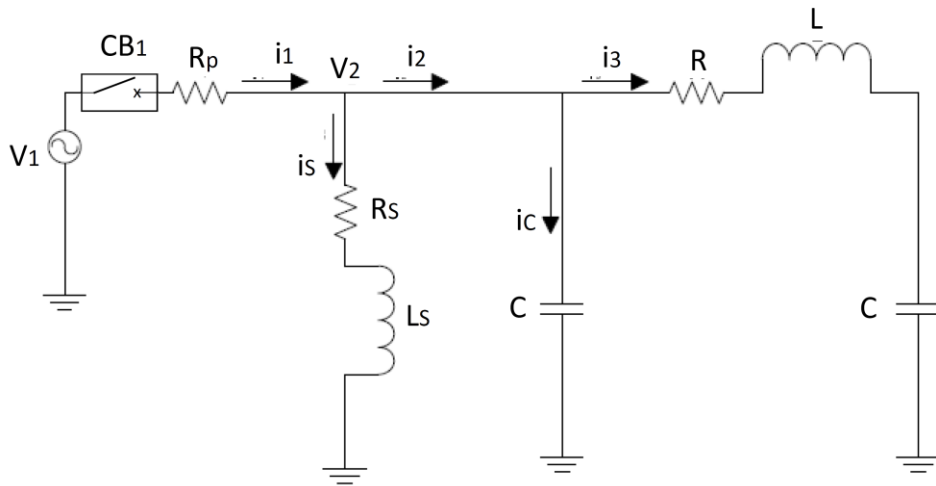


komora wspomagająca PIR w pozycji “ZAŁĄCZ” , PIR
zwały , nie przewodzi prądu

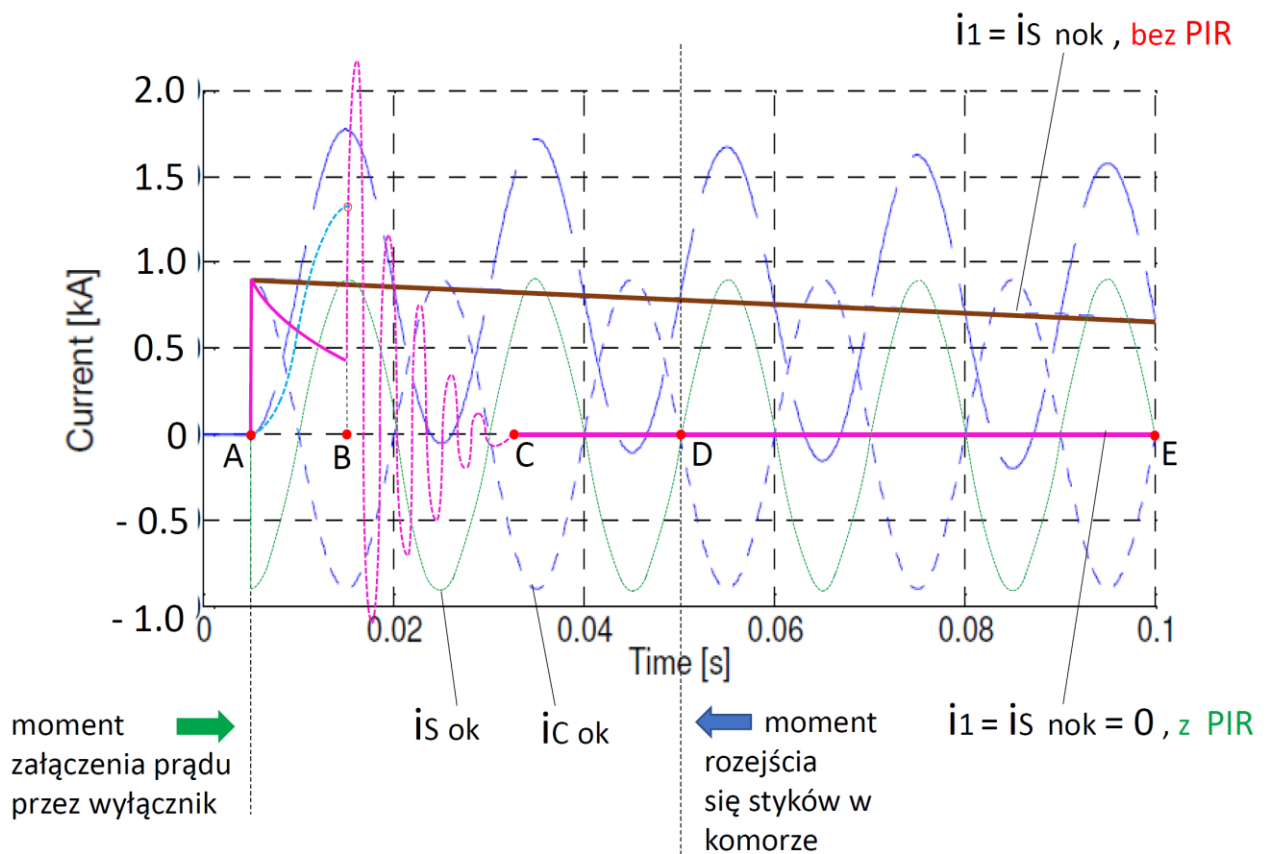


RYS. 6. Funkcjonalne elementy zespołu : rezystor załączający PIR oraz pomocnicza komora łączeniowa , równolegle podłączona do tego elementu.

Analizę przebiegów czasowych prądów , w przypadku operacji łączeniowych polegających na załączaniu długiego , nieobciążonego kabla WN skompensowanego dławikiem , z zastosowaniem wyłącznika z rezystorem załączającym PIR , oparto o schemat funkcjonalny , pokazany RYS. 7 [1] . W przypadku załączenia nieobciążonego kabla (w 100% skompensowanego dławikiem) - zerze napięcia zasilania - (patrz RYS. 2 oraz RYS. 8) przez ok. 10 ms (patrz przedział czasowy A...B , RYS. 8) przez rezystor PIR zintegrowany z wyłącznikiem CB1 przepływa silnie tłumiony prąd nieokresowy dławika i_{Σ} nok . Po zwarcie rezystora PIR przez komorę pomocniczą (patrz RYS. 5 oraz RYS. 6) nagły spadek rezystancji w obwodzie (zanika spadek napięcia na PIR - po jego zwarciu !), wymusza stan przejściowy w postaci oscylacji prądu i_{Σ} (patrz RYS. 8 , przedział czasowy B...C) , z względnie wysoką częstotliwością oscylacji. Należy zwrócić uwagę na fakt , że w przypadku PIR o rezystancji $R_p = 300 - 400 \Omega$, przy przepływie prądu $i_{\Sigma} = 300 - 400 \text{ A}$ (DC !), na rezystorze R_p chwilowy spadek napięcia (patrz punkt B , RYS. 8) może osiągać wartości na poziomie 120 ... 160 kV ! Po ustaniu oscylacji prądu patrz punkt C , składowa nieokresowa w postaci prądu $i_{\Sigma} = 0!$



RYS. 7. Schemat uwzględniający model kabla z typu "PI"(Pi) ; rezystor załączający PIR (Pre-Insertion-Resistor) [1].
 R_p - rezystor załączający (PIR)
 R_s ; L_s - dławik kompensacyjny
 R ; L ; C - elementy modelujące kabel



RYS. 8. Przebiegi czasowe prądów po załączeniu nieobciążonego kabla WN , skompensowanego dławikiem (załączenie w zerze napięcia zasilania , patrz RYS. 2) , z zastosowaniem wyłącznika z rezystorem załączającym PIR .

$i_{c\ ok}$ - prąd pojemnościowy nieobciążonego kabla

$i_{s\ ok}$ - składowa okresowa prądu dławika

$i_{s\ nok}$ - składowa nieokresowa (DC) prądu dławika

$i_1 = i_{s\ nok}$ - prąd od strony zasilania , płynący przez wyłącznik CB1 (patrz RYS. 7)

A...B - przedział czasowy (ok. 10 ms) : $i_{s\ nok}$ płynie przez : dławik ; rezystor PIR ; wyłącznik CB1 (patrz RYS. 7)

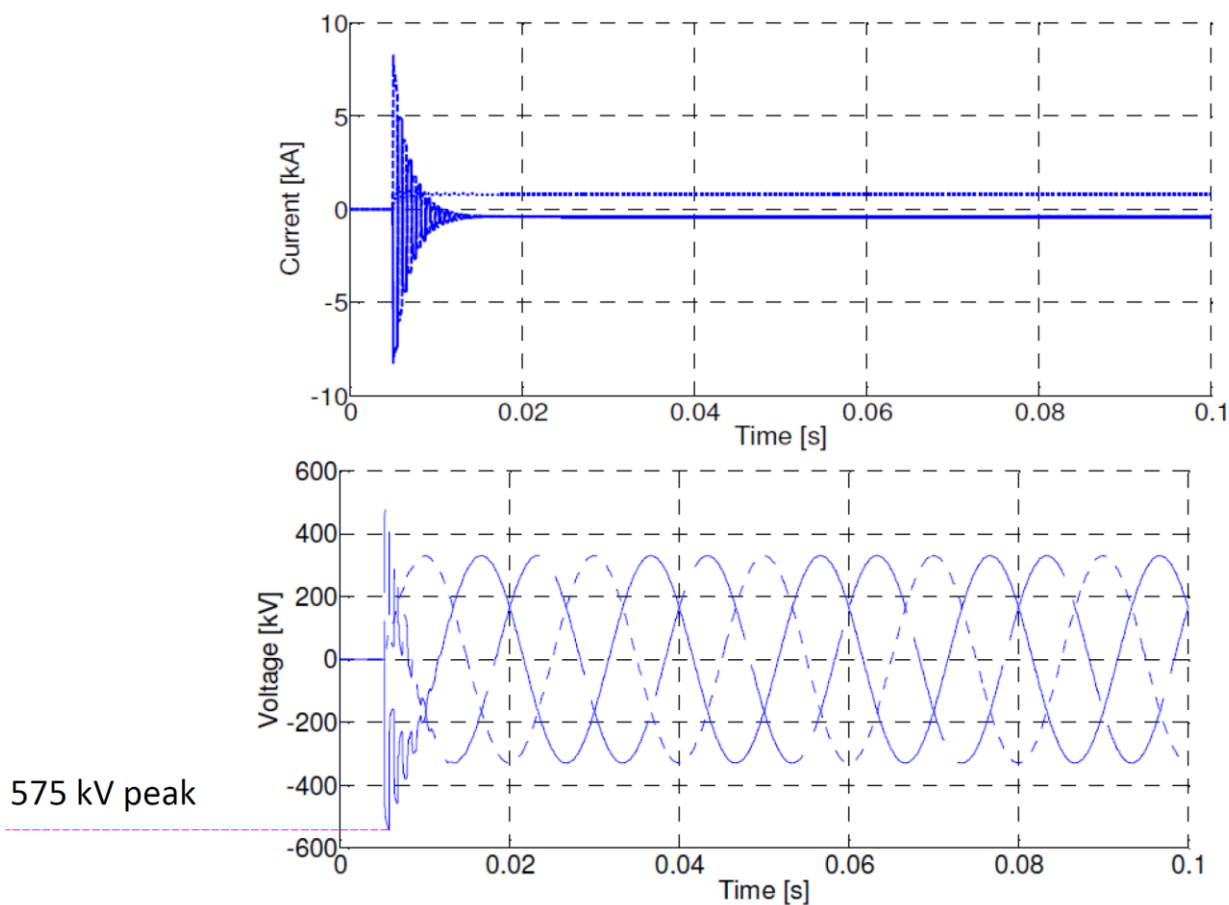
B...C - przedział czasowy : prąd z oscylacjami po zwarciu PIR przez komorę pomocniczą (patrz RYS. 5 oraz RYS. 6)

C...D - przedział czasowy : prąd oscylacyjny = 0... do momentu rozejścia się styków w komorze wyłącznika

W rzeczywistych warunkach eksploatacji stacji, nie należy zakładać 100% kompensacji mocy biernej w kablu przez dławik, oraz przebiegu prądów kabla oraz dławika idealnie w przeciwfazie. Dlatego przez wyłącznik CB1 z rezystorem PIR (patrz RYS. 7), po wytlumieniu oscylacji prądu (patrz punkt C, RYS. 8) płynie niewielki prąd symetryczny AC i wyłącznik CB1 w punkcie D ten prąd bez problemu wyłączy.

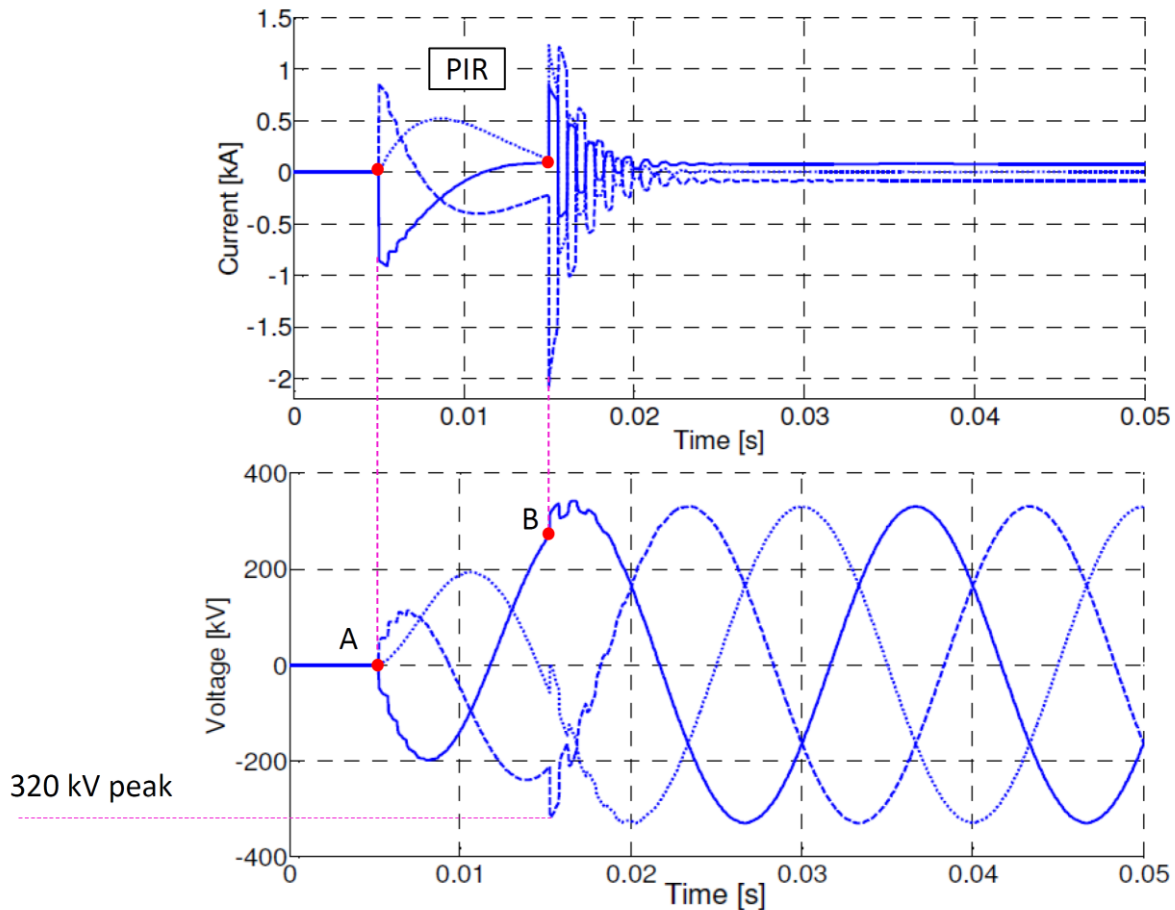
3. Wpływ wyłącznika z rezystorem załączającym PIR, na redukcję przepięć, generowanych podczas załączania nieobciążonych kabli WN, skompensowanych dławikiem.

Typowy przebieg prądów oraz napięć po jednoczesnym załączeniu trzech faz, przypadek: nieobciążony kabel skompensowany dławikiem, przedstawiono na RYS. 9. Oscylacjom prądów z wysoką amplitudą i stromością narastania towarzyszą szybko zmienne przepięcia (patrz przebiegi czasowe napięć), z amplitudą ok. 575 kVpeak, co w przypadku napięcia sieci 400 kV, oznacza przepięcia o współczynniku $k_u = 1.75$, które mogą być niebezpieczne dla „zestsarszałej” izolacji kabla, dławika czy przekładników napięciowych.



RYS. 9. Typowy przebieg prądów oraz napięć po jednoczesnym załączeniu trzech faz, przypadek: nieobciążony kabel skompensowany dławikiem, sieć 400 kV [1].

Przebiegi prądów oraz napięć po jednoczesnym załączeniu trzech faz nieobciążonego kabla, skompensowanego dławikiem przez wyłącznik 400 kV wyposażony w rezystor załączający PIR, przedstawiono na RYS. 10. W przedziale czasowym A...B przez rezystor PIR przepływa prąd, skutecznie tłumiąc składowe nieokresowe prądy (patrz także RYS. 8), a także zapobiegając generacji przepięć o wysokiej stromości narastania! W punkcie B rezystor PIR jest zwierany przez komorę pomocniczą (patrz także: RYS. 5; RYS. 6; RYS. 8) co wywołuje oscylacje prądów, ale wartość przepięć w punkcie B jest skutecznie ograniczona, gdyż ich amplituda jest na poziomie 320 kVpeak, co oznacza redukcję przepięć do wartości procentowej $100\% \times 320 \text{ kV} / 575 \text{ kV} = 56\%$!



RYS. 10. Przebieg prądów oraz napięć po jednoczesnym załączeniu trzech faz przez wyłącznik z rezystorem załączającym PIR, przypadek : nieobciążony kabel skompensowany dławikiem, sieć 400 kV [1].

WNIOSKI

W Morskich Farmach Wiatrowych dla wyprowadzenia mocy na ląd, są stosowane względnie długie kable „eksportowe” do 60 km (!), często z kompensacją strat przy pomocy dławika, dlatego należy rozważyć stosowanie wyłączników GIS wykonaniu specjalnym, tzn. z zespołem rezystora załączającego PIR z komorą pomocniczą, równoległe przyłączoną do tego rezystora.

Wyłączniki w wykonaniu specjalnym z rezystorami załączającymi PIR nie tylko skutecznie tłumią składową nieokresową prądów, po załączeniu nieobciążonego kabla - skompensowanego dławikiem, co pozwala pewnie wyłączyć w/w prądy ale i efektywnie ogranicza poziom przepięć, towarzyszących tej operacji.

Wartości oporności rezystorów załączających PIR w przedziale od 100 ... do 400 Ω . Należy dobrać ten element wykonując odpowiednie obliczenia, uwzględniając zarówno parametry kabla jak i dławika kompensacyjnego, zainstalowanych w sieci z daną konfiguracją.

W przypadku załączania bardzo długich, nieobciążonych kabli WN skompensowanych dławikiem, jest preferowane zastosowanie wyłączników z rezystorem załączającym PIR, w porównaniu z inną metodą eliminacji skrajnie asymetrycznych prądów generowanych przez dławiki kompensacyjne, tzn. zsynchronizowane załączenia w maksimum napięcia zasilania w każdej z faz, co wymaga zastosowania wyłączników z komorami gaszeniowymi posiadającymi swoje niezależne napędy, oraz odpowiednich sterowników z zawansowanym oprogramowaniem, dostosowanym do indywidualnych cech danego wyłącznika.

LITERATURA

[1]. F. Faria da Silva, C. L. Bak, U. S. Gudmundsdottir, W. Wiechowski and M. R. Kanardrupgard. "Methodes to Minimize Zero-Missing Phenomenon". IEEE PES Transactions on Power Delivery, TPWRD-00683-2009.