

Wiesław Nowak*, Jan Sawicki**, Edward Stawowy**

NARAŻENIA PRZEPIĘCIOWE PRZY WYŁĄCZANIU DŁAWIKÓW KOMPENSACYJNYCH W STACJI 750/400/110 KV RZESZÓW

Streszczenie: W referacie przedstawiono kompensację pojemności linii Rzeszów–Tuczna przy wykorzystaniu dławików zainstalowanych w rozdzielni 750 kV stacji RZESZÓW. Przedstawiono wyniki analizy wpływu kompensacji na poziomy napięcia w węzłach systemu 400 kV oraz przebiegów przejściowych przy wyłączeniu dławików.

Słowa kluczowe: linie elektroenergetyczne, dławiki kompensacyjne, wyłączanie prądów indukcyjnych

1. Wstęp

W latach 90. nastąpił w kraju spadek zapotrzebowania na energię elektryczną, spowodowany zmianami społeczno-politycznymi w Europie Środkowo-Wschodniej. W powstałej sytuacji okazało się, że niektóre linie systemowe o napięciu 220 kV i 400 kV są w pewnych porach roku słabo obciążone. Takim przykładem jest linia 400 kV łącząca stację RZESZÓW ze stacją TUCZNAWA o łącznej długości prawie 270 km. Obciążenie tej linii małą mocą jest przyczyną wzrostu napięcia powyżej wartości dopuszczalnej 420 kV w niektórych węzłach systemu, szczególnie w Rzeszowie i sąsiednich stacjach. Tym niekorzystnym wzrostem napięcia zapobiega się przez:

- wyłączenie linii Rzeszów–Tuczna,
- załączenie jednego z dławików w rozdzielni 750 kV stacji Rzeszów, które w pierwotnym założeniu miały kompensować (niepracującą obecnie) linię 750 kV Rzeszów–Chmielnicka EA.

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

** Biuro Studiów i Projektów Energetycznych ENERGOPROJEKT-KRAKÓW SA, ul. Mazowiecka 21, 30-019 Kraków

Oba sposoby mają wady. Wyłączenie linii zmniejsza bowiem pewność pracy systemu. Natomiast dławiki w rozdzielni 750 kV (o mocy 330 Mvar) stanowią za duży odbiór mocy biernej w tym punkcie sieci, co prowadzi do niekorzystnego (nadmiernego) obniżenia napięcia, co z kolei wymaga wygenerowania dodatkowej mocy biernej w Elektrowni Połaniec. Z tego powodu nasuwa się koncepcja przyłączenia dławików bezpośrednio do rozdzielni 400 kV w stacji RZESZÓW z pominięciem autotransformatorów.

Wszelkiego rodzaju operacje łączeniowe związane z wyłączeniem dławików prowadzą do narażeń przepięciowych, które stanowią zagrożenie dla urządzeń i aparatury stacyjnej. Jest to związane z wyłączaniem prądów o charakterze indukcyjnym i zjawiskiem ucięcia tego prądu przed jego naturalnym przejściem przez zero.

2. Wpływ kompensacji na poziom napięcia w węzłach systemu 400 kV

Na rysunku 1 przedstawiono fragment Polskiego Systemy Elektroenergetycznego 400 kV. Z rozdzielni 400 kV stacji RZESZÓW (RZE) wyprowadzone są cztery linie do stacji KROSNO (KRO), POŁANIEC (PEL), TARNÓW (TAW) i TUCZNAWA (TCN). Analizę przeprowadzono zakładając trzy podstawowe warianty układu:

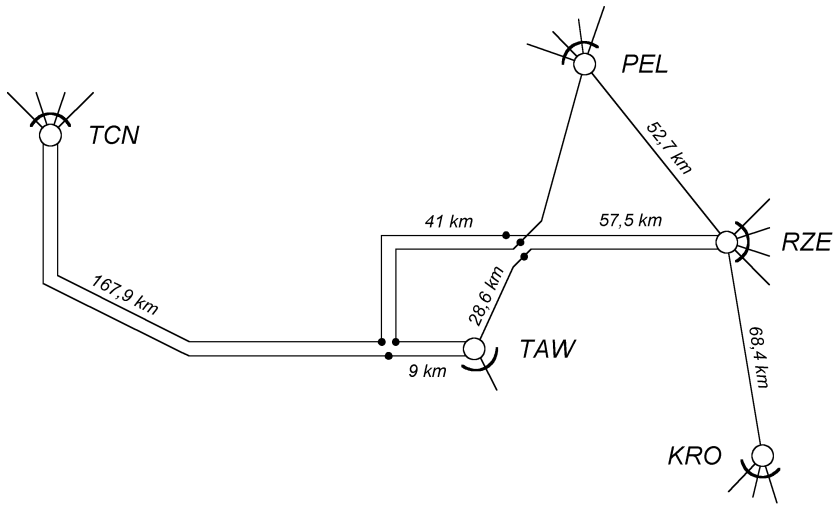
- I — praca bez dołączonych dławików — na rysunku 2 dwie grupy D1 i D2 jednofazowych dławików o mocy 3×110 Mvar każda,
- II — praca jednej (IIa) lub dwóch (IIb) grup dławików na poziomie napięcia 750 kV przy najmniejszej wartości przekładni autotransformatorów, tj. 712,5 kV/410 kV,
- III — praca jednej (IIIa) lub dwóch (IIIb) grup dławików bezpośrednio przyłączonych do rozdzielni 400 kV (z pominięciem autotransformatorów).

Obliczenia wykonano w programie do obliczeń rozpliwów mocy PLANS oraz porównawczo w programie symulacyjnym EMTP/ATP. W tabeli 1 przedstawiono przykładowy rozpliw mocy i napięcia w węzłach systemu bez stosowania kompensacji (wariant I), charakterystyczny dla „doliny letniej” obciążenia. Natomiast w tabeli 2 zawarte są dla tej sytuacji wyniki obliczeń napięć w węzłach odbiorczych dla różnych wariantów kompensacji.

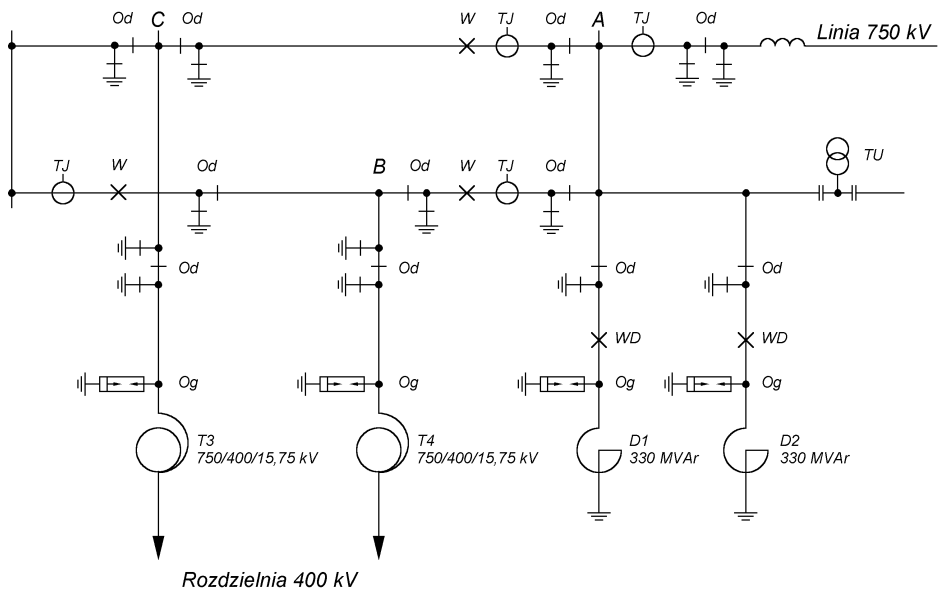
Jak można zauważyć w wariantcie I napięcia w stacjach RZESZÓW, TARNÓW oraz KROSNO przekraczają wartość dopuszczalną 420 kV.

W przypadku wariantu II następuje obniżenie napięcia w tych stacjach poniżej 420 kV, zarówno przy dołączonej jednej, jak i dwóch grupach dławików. Praca dławików w tym wariantcie związana jest jednak z generacją mocy biernej w Elektrowni Połaniec. Również w wariantcie III następuje obniżenie napięcia w rozważanych stacjach — jednak nie jest to związane z koniecznością generacją mocy biernej w Elektrowni Połaniec.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że optymalnym sposobem kompensacji jest kompensacja na poziomie napięcia 400 kV przy załączonej jednej grupie dławików.



Rys. 1. Połączenie stacji RZESZÓW z systemem 400 kV



Rys. 2. Schemat rozdzielni 750 kV stacji RZESZÓW [1]

Tabela 1. Przykładowy rozpływ mocy dla „doliny letniej” obciążenia

Nazwa węzła	Moc czynna*) [MW]	Moc bierna*) [Mvar]	Napięcie [kV]	Uwagi
PEL	+24	-136	411,2	węzeł bilansujący
TCN	+177	-209	417,0	węzeł elektrowniany
RZE	-97	-20	423,4	węzeł odbiorczy
TAW	-40	-49	422,9	węzeł odbiorczy
KRO	-64	-17	423,3	węzeł odbiorczy

*) + – moc wytwarzana, – – moc pobierana

Tabela 2. Napięcia w węzłach odbiorczych dla „doliny letniej” obciążenia przy różnych wariantach kompensacji

Nazwa węzła	Napięcie [kV] dla wariantu				
	I	IIa	IIb	IIIa	IIIb
RZE	423,4	409,9	397,8	418,6	414,0
TAW	422,9	413,7	405,4	419,1	416,4
KRO	423,3	409,8	397,7	418,5	413,9

3. Analiza przebiegów i napięć powrotnych przy wyłączeniu dławików kompensacyjnych

3.1. Prąd ucięcia przy wyłączeniu prądów indukcyjnych

Wyłączanie prądów indukcyjnych wiąże się z możliwością ucięcia wyłączanego prądu i generacją znacznych przebiegów. Powstały po utracie styczności styków wyłącznika łuk elektryczny pali się stabilnie przy większych wartościach prądu, ale w mniejszych zakresach może mieć charakter niestabilny. Powoduje to, że w przebiegu prądu łuku pojawiają się oscylacje o szybko zwiększającej się amplitudzie, w wyniku czego prąd może osiągnąć wartość zero przed jego naturalnym przejściem przez zero — rysunek 3. Tak więc zgaszanie prądu następuje przy prądzie ucięcia i_{ch} .

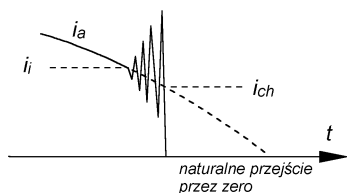
Wartość prądu ucięcia zależy od pojemności wypadkowej C_t widzianej z zacisków wyłącznika (rys. 4), ilości komór gaszeniowych N i współczynnika ucięcia λ [2]:

$$i_{ch} = \lambda \sqrt{N C_t} \quad (1)$$

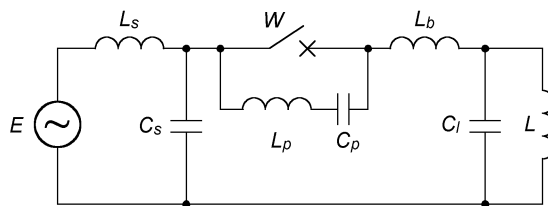
Współczynnik ucięcia jest wielkością charakterystyczną dla danego rodzaju wyłącznika i jego typowe wartości przedstawia tabela 3.

Największym prądem ucięcia charakteryzują się wyłączniki powietrzne. Wynika to zarówno z większej wartości współczynnika λ , jak i z faktu, że w zakresie wysokich i najwyższych napięć budowane są one z ilością komór gaszeniowych $N = 2-8$. Natomiast współczesne konstrukcje wyłączników SF_6 charakteryzują się ilością komór $N = 1-2$, nawet w zakresie napięcia znamionowego do 550 kV. Ponadto współczyn-

niki λ dla tych wyłączników zawiera się w niższym zakresie niż dla wyłączników powietrznych.



Rys. 3. Zjawisko ucięcia prądu [2]: i_a – prąd płynący przez dławik, i_i – granica stabilności łuku elektrycznego, i_{ch} – prąd ucięcia



Rys. 4. Obwód do wyznaczania prądu ucięcia [2]: L – indukcyjność dławika, L_b – indukcyjność połączeń, L_p – indukcyjność wyłącznika, L_s – indukcyjność po stronie zasilania, C_l – pojemność po stronie dławika, C_p – pojemność wyłącznika, C_s – pojemność obwodu po stronie zasilania, W – wyłącznik, E – zasilanie

Tabela 3. Współczynnik ucięcia dla różnych rodzajów wyłączników [2]

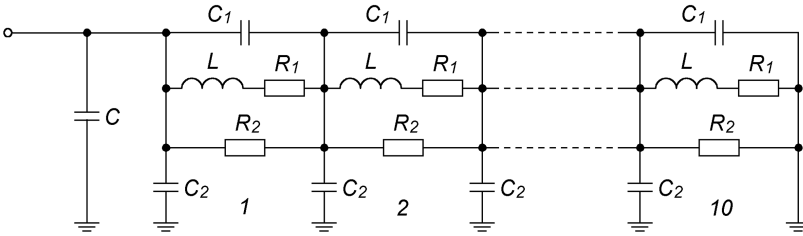
Rodzaj wyłącznika	λ [AF ^{-0,5}]
małoolejowy	$(7-10) \cdot 10^4$
powietrzny	$(15-25) \cdot 10^4$
SF ₆	$(4-17) \cdot 10^4$

3.2. Model układu

Analizę przepięć i napięć powrotnych przy wyłączaniu jednej grupy (D1 — rysunek 2) dławików kompensacyjnych przeprowadzono z wykorzystaniem programu EMTP/ATP. Rozważono pięć wariantów pracy układu, które przedstawia tabela 4.

Dławiki kompensacyjne 110 Mvar zostały zamodelowane na podstawie [3] jako cewki dziesięciowarstwowe, której schemat przedstawiono na rysunku 5. W pracy [3] ten model dławika został pozytywnie zweryfikowany na podstawie badań przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym. Odgromniki zaworowe SiC chroniące dławiki, odwzorowano jako oporniki nieliniowe (element typu 92) z napięciem przeskoku wynoszącym 1350 kV. W przypadku ograniczników beziskiernikowych ZnO, wykorzystano model częstotliwościowo zależny i procedurę jego otrzymania proponowane przez IEEE WG 3.4.11 [4].

Model autotransformatora T4 (rysunek 2) otrzymano na podstawie jego danych znamionowych przy pomocy procedury BCTRAN i wzbogacono o pojemności. Połączenia pomiędzy autotransformatorem T4 a wyłącznikami dławików WD, odwzorowano jako trzy połączone szeregowo układy sprzężonych wzajemnie czwórników typu π , o parametrach wyznaczonych przy pomocy procedury LINE CONSTANTS. Natomiast do modelowania linii 400 kV przedstawionych na rysunku 1, zastosowano procedurę częstotliwościowo zależną JMARTI SETUP.



Rys. 5. Schemat dławika kompensacyjnego $787/\sqrt{3}$ kV, 110 Mvar [3]

Tabela 4. Warianty analizy układu

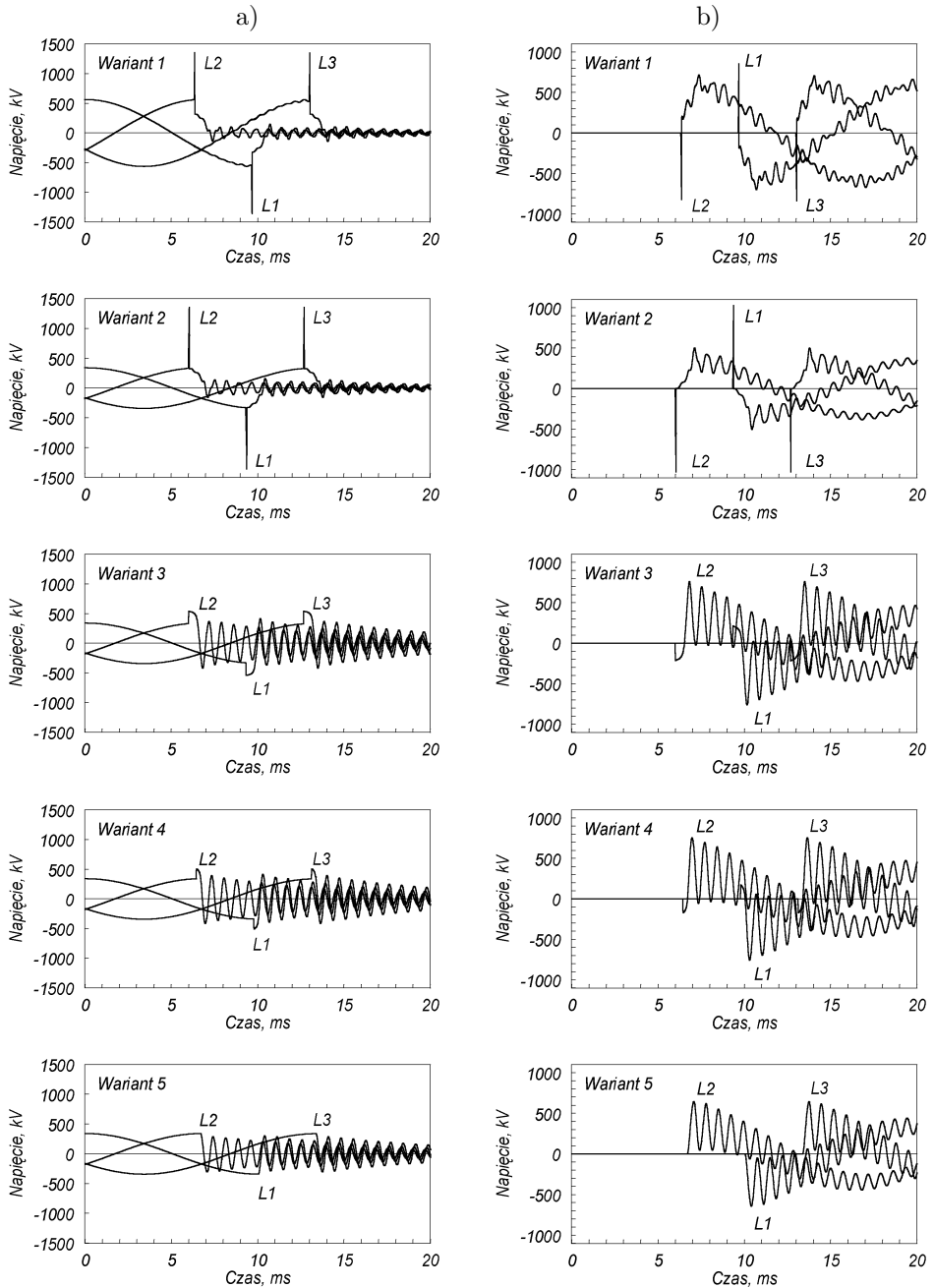
Wariant	Rodzaj kompensacji	Ogranicznik przepięć dławika	Wyłącznik dławika
1	na napięciu 712,5 kV (poprzez autotransformator)	istniejący, zaworowy (SiC), napięcie zadziałania przy przepięciach łączeniowych – 1350 kV	istniejący, powietrzny, $N = 8$, $i_{ch} = 35$ A
2	na napięciu 400 kV (z pominięciem autotransformatora)	jak 1	jak 1, ale $i_{ch} = 40$ A
3	jak 2	nowy, beziskiernikowy (ZnO): $U_m = 420$ kV, $U_r = 330$ kV, $U_c = 264$ kV, $U_{res} = 634$ przy 1 kA 30/60 μ s	jak 2
4	jak 2	jak 3	nowy, SF ₆ , $N = 2$, $i_{ch} = 15$ A
5	jak 2	jak 3	nowy, synchronizowany, $i_{ch} = 0$ A

3.3. Wyniki obliczeń

Otrzymane wyniki przebiegów napięć na dławikach oraz napięć powrotnych na wyłącznikach dławików przedstawiono na rysunku 6. W wariacie 1 i 2 największa wartość napięcia na dławikach wynosi 1350 kV i wynika z zadziałania odgromników zaworowych. W wariantach 3 i 4 wartości te wynoszą odpowiednio 542 kV oraz 509 kV. Ponadto uwidacznia się odmienny charakter przebiegów, co spowodowane jest działaniem ograniczników ZnO. Natomiast w wariacie 5 brak jest przepięcia przy wyłączeniu dławików.

Napięcia powrotne w wariacie 1 i 2 mają przebieg zbliżony do siebie. Ich wartości szczytowe i początkowe stromości narastania wynoszą: 1 – 824 kV; 19,1 kV/ μ s, 2 – 1029 kV; 21,4 kV/ μ s. Większe wartości w wariacie 2 wynikają z większego prądu uciążenia. Również w wariacie 3 i 4 charakter przebiegów jest zbliżony, ale odmienny od poprzednich.

Wartość pierwszego ekstremum, wartość szczytowa i początkowa stromość narastania odpowiednio wynosi: 3 – 214 kV; 761 kV; 19,8 kV/ μ s, 4 – 170 kV; 757 kV;



Rys. 6. Przebiegi napięć na dławikach (a) i napięć powrotnych (b) dla wariantów 1–5 przy wyłączaniu grupy D1 (L1, L2, L3 — fazy układu)

8,6 kV/ μ s. Natomiast w wariancie 5 wartość szczytowa wynosi 645 kV, a początkowa stromość narastania – 0,23 kV/ μ s.

4. Podsumowanie

Problem kompensacji pojemności słabo obciążonych linii długich wysokich i najwyższych napięć jest bardzo istotny ze względów eksploatacyjnych. W rozważanym przypadku zastosowanie do kompensacji dławików w stacji RZESZÓW pozwala na obniżenie napięć w węzłach sieciowych poniżej wartości dopuszczalnej. Proponowanym rozwiązaniem jest przyłączenie jednej grupy dławików na poziomie napięcia 400 kV.

Przeprowadzona analiza przebiegów łączeniowych związanych z wyłączeniem dławików wykazuje, że zastosowane środki ochrony przepięciowej w każdym analizowanym wariancie obniżają wartości szczytowych przepięć poniżej napięcia probierczego izolacji dławików, wynoszącego 1550 kV [1]. Natomiast w wyborze sposobu ograniczenia napięcia powrotnego pojawia się istotna trudność, ze względu na brak w obowiązującej normie wymagań dla wyłączników, co do maksymalnej wartości i stromości napięcia powrotnego przy wyłączaniu prądów indukcyjnych. Oczywiście najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie wyłącznika synchronizowanego. Jednak o ostatecznym wyborze wariantu powinien decydować rachunek techniczno-ekonomiczny, a wybór wyłącznika powinien być uzgodniony z jego producentem.

Literatura

- [1] Biuletyn Techniczny *Sieci Elektroenergetyczne*, BSiPE Energoprojekt, Kraków, 4/1985
- [2] **Peelo P. F.**: *A new IEEE application guide for shunt reactor switching*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 881–887
- [3] **Prikler L.**: *Switching off 750 kV shunt reactors. Comparison between field test and computer simulation*, 19th European EMTP User Group Meeting, Leuven 15–16 Okt. 1990
- [4] **IEEE WG 3.4.11**: *Modelling of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 302–309
- [5] **Kucharz S., Paleczny W.**: *Analiza sposobu przyłączenia dławików kompensacyjnych w stacji 750/400/110 kV Rzeszów*, Praca dyplomowa, Zakład Elektroenergetyki AGH, Kraków 1999

OVERVOLTAGES AT DISCONNECTING OF SHUNT REACTORS IN 750/400/110 KV SUBSTATION

In this paper the problem of capacitance compensation of 400 kV line with use of shunt reactors is presented. The results of analysis of compensation influence on the voltage levels and electrical transients at disconnecting of reactors are shown.

Część niniejszej pracy finansowana jest przez Komitet Badań Naukowych w ramach umowy nr 10.10.120.508