



Wiesław NOWAK¹, Rafał TARKO¹, Paweł ZYDRON¹
Andrzej JAGLARZ², Jan KOZIOŁ²,

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki (1)
ENION S.A., Oddział w Tarnowie – Zakład Energetyczny Tarnów (2)

Analiza warunków eksploatacyjnych linii napowietrznych – studium efektu sprzężeń elektromagnetycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę oddziaływań elektromagnetycznych pracującego toru napowietrznej linii elektroenergetycznej na równoległy tor linii znajdujący się w stanie beznapięciowym. Rozważania przeprowadzono na podstawie wyników otrzymanych podczas pomiarów na rzeczywistym obiekcie oraz dla modelu komputerowego opisanego układu. Dla opisu matematycznego problemu wykorzystano program EMTP-ATP, co pozwoliło również na analizę innych stanów pracy linii.

Abstract. (Analysis of overhead lines working conditions – case study of electromagnetic coupling effect). The paper presents analysis of electromagnetic coupling effects between working overhead transmission line and parallel switched-off line. Considerations have been made on the basis of measurement results from really existing lines and also for numeric model of described system. Computer program EMTP-ATP was used for mathematical description of the problem, and different states of the working object were also analyzed.

Słowa kluczowe: sprzężenia elektromagnetyczne, linie napowietrzne, modelowanie komputerowe, EMTP-ATP

Keywords: electromagnetic coupling, overhead lines, computer modeling, EMTP-ATP

Wstęp

Pole elektromagnetyczne wytwarzane przez obiekty elektroenergetyczne charakteryzuje się szerokim widmem częstotliwości, jednak w warunkach normalnej eksploatacji dominujące znaczenie mają pola elektryczne i magnetyczne o częstotliwości sieciowej. Obecność tych pól ma istotne znaczenie ze względu na dwa podstawowe aspekty. Pierwszym z nich jest wpływ tych pól na organizmy żywe i ewentualne zagrożenia z tym związane. Drugi aspekt - techniczny - dotyczy szeroko rozumianej kompatybilności elektromagnetycznej i wynika z oddziaływań, których skutkiem są m.in. napięcia i prądy indukowane w obiektach sąsiednich, w tym, w innych liniach elektroenergetycznych. Wartości indukowanych napięć i prądów zależne są od wielu czynników, przede wszystkim od: poziomów napięć i wielkości obciążeń w obwodach elektroenergetycznych, stanu pracy (normalny, zwarcie itp.) oraz ich wzajemnej lokalizacji przestrzennej. Należy zaznaczyć, że niska wartość częstotliwości (50Hz/60Hz) powoduje, że podczas obliczeń możliwe jest oddzielne potraktowanie sprzężeń pojemnościowych i magnetycznych pomiędzy obiektami.

Oddziaływanie pojemnościowe jest skutkiem pola elektrycznego, wytwarzanego przez znajdujące się pod napięciem obwody elektroenergetyczne. Oddziaływanie magnetyczne wynika z faktu istnienia w otoczeniu obwodów prądowych zmiennego w czasie pola magnetycznego, indukującego w sąsiednich obiektach prądy i napięcia. Szczególne znaczenie ma oddziaływanie magnetyczne w stanach zwarć w sieciach wysokich i najwyższych napięć, a więc pracujących z bezpośrednio uziemionym punktem gwiazdowym, gdzie wartości prądów zwarciovych wielokrotnie przewyższają wartości prądów znamionowych.

Oddziaływania elektromagnetyczne mogą powodować negatywne skutki w postaci zagrożeń i zaburzeń w pracy układów, a także zmniejszenia bezpieczeństwa ich obsługi. Rozpoznanie i możliwość oceny skutków, jak i ewentualne określenie dopuszczalnego ich poziomu, prowadzi w praktyce eksploatacyjnej do wyboru optymalnych rozwiązań obsługi. Tym samym, umożliwia podejmowanie racjonalnych decyzji w zakresie wdrażania nowych technologii oraz

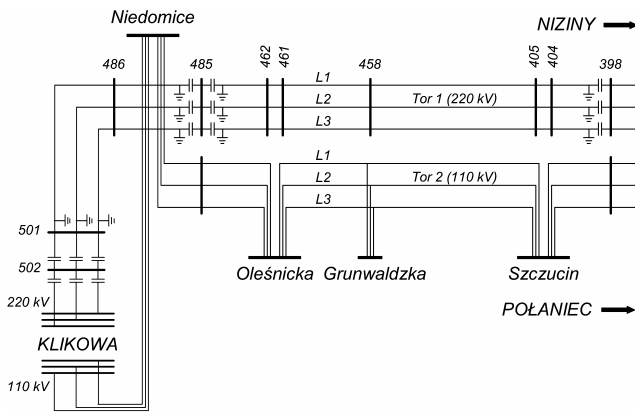
zmian w zasadach organizacji pracy. Jednocześnie brak rozpoznania i eliminacji skutków oddziaływań może być przyczyną niewłaściwej pracy urządzeń elektroenergetycznych, a w szczególnych przypadkach może powodować zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi. Zapewnienie bezpieczeństwa ludzi podczas prowadzenia prac w pobliżu czynnych, będących pod napięciem urządzeń, wymaga również – oprócz konieczności zachowania odległości bezpiecznych – uwzględnienia ewentualnego oddziaływania elektromagnetycznego, na przykład od zbliżonej na pewnym odcinku innej linii elektroenergetycznej.

W artykule przedstawiono analizę efektu sprzężeń pojemnościowych i magnetycznych pomiędzy liniami napowietrzными na przykładzie linii 110 kV i 220 kV, zbliżonych do siebie w wyniku prowadzenia ich na wspólnych konstrukcjach wsporczych. Model matematyczny, zweryfikowany pomiarami w warunkach rzeczywistych, stał się podstawą określenia warunków eksploatacyjnych układu.

Charakterystyka analizowanego układu

Rozpatrywany układ stanowią dwie napowietrzne linie elektroenergetyczne: jedna o napięciu znamionowym 110 kV relacji Klikowa-Połaniec i druga o napięciu znamionowym 220 kV relacji Klikowa-Niziny (rys. 1). Linie te na obszarze eksploatacji ZE Tarnów prowadzone są pomiędzy słupami nr 485 i nr 398 jako dwa tory usytuowane na wspólnych konstrukcjach wsporczych serii H w płaskim układzie przewodów. Linia 220 kV relacji Klikowa-Niziny wyprowadzona jest z rozdzielni 220 kV stacji Klikowa. Całkowita jej długość wynosi 53211 m, przy czym w eksploatacji ZE Tarnów pozostaje odcinek pomiędzy słupem nr 502 i nr 398 o długości 32211 m. W chwili obecnej linia Klikowa-Niziny jest trwale wyłączona z ruchu i pozostaje bez napięcia. Linia jest rozmostkowana na słupach 502, 485 i 398 oraz trwale uziemiona na słupie nr 501 i nr 398 oraz obustronnie na słupie nr 485 (rys. 1).

Układ linii 110 kV relacji Klikowa-Połaniec złożony jest z czterech odcinków (rys. 1): linii Klikowa-Niedomice, linii Niedomice-Oleśnicka, linii Oleśnicka-Szczucin z odczepem do stacji Grunwaldzka oraz linii Szczucin-Połaniec.



Rys.1. Schemat analizowanego układu

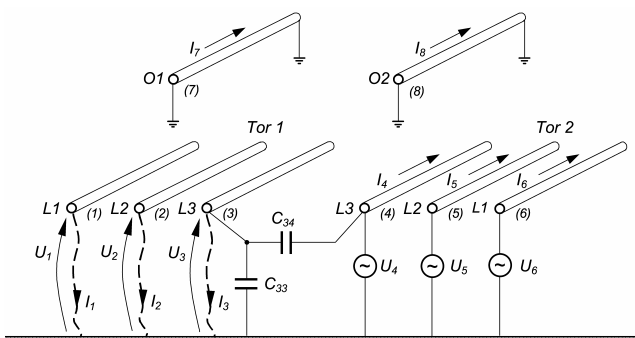
W analizowanym układzie pomiędzy słupami nr 485 i nr 398 występuje zbliżenie ciągu 110 kV Klikowa–Połaniec z niepracującą linią 220 kV Klikowa–Niziny, wynikające z umieszczenia przewodów tych linii na wspólnych konstrukcjach wsporczych. Pod względem oddziaływania elektromagnetycznego toru 110 kV na tor 220 kV wyróżnić można cztery charakterystyczne odcinki:

- odcinek linii Niedomice-Oleśnicka o długości 7224 m,
- odcinek linii Oleśnicka-Szczucin do odczepu do stacji Grunwaldzka o długości 1297 m,
- odcinek linii Oleśnicka-Szczucin od odczepu do stacji Grunwaldzka do odejścia w kierunku stacji Szczucin o długości 15549 m,
- odcinek linii Szczucin-Połaniec od słupa nr 404 do słupa nr 398 (stanowiącego granicę eksploatacji ZE Tamów) o długości 2196 m.

Łączna długość zbliżenia linii wynosi 26266 m, przy całkowitej długości odcinka linii 220 kV pomiędzy słupami nr 485 i nr 398 wynoszącej 26876 m.

Model matematyczny oddziaływań

Znajdujące się pod napięciem roboczym przewody fazy toru 2, wytwarzają w otaczającej przestrzeni pole elektryczne. W sytuacji, gdy przewody fazy toru 1 nie są uziemione, uzyskują względem ziemi określony potencjał. W wyniku sprzężenia pojemnościowego dochodzi więc do indukowania napięć doziemnych U_1, U_2, U_3 , co ilustruje schemat zastępczy oddziaływania przedstawiony na rysunku 2. W przypadku uziemienia przewodów podlegających oddziaływaniu, ich potencjał wynosi zero, a wartości doziemnych prądów rozładowania I_1, I_2, I_3 określają wydajność prądową oddziaływania w aspekcie potencjalnego zagrożenia porażeniowego.

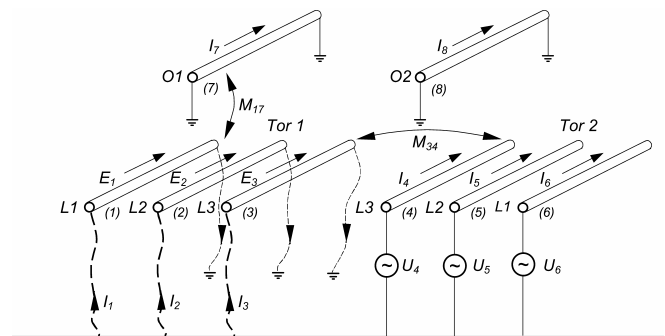


Rys.2. Schemat zastępczy oddziaływania pojemnościowego C_{ij} – pojemności własne (doziemne), C_{ij} – pojemności wzajemne (międzyprzewodowe) $i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 8, i \neq j$

Wartości indukowanych pojemnościowo napięć i prądów zależne są od napięć toru oddziałującego, przestrzennego usytuowania przewodów i długości odcinka zbliżenia. Istotne jest również oddziaływanie uziemionych przewodów odgromowych. Teoretyczne metody analizy oddziaływań pojemnościowych (na przykład [2, 3, 4]) oparte są na prawach elektrostatyki, na podstawie których formułuje się odpowiednie układy równań algebraicznych, pozwalające na określenie pojemności cząstkowych rozpatrywanego układu. Należy zwrócić uwagę, że pomimo zastosowania niejednokrotnie złożonych algorytmów obliczeniowych z wykorzystaniem komputerowej techniki obliczeniowej, na końcowy wynik analizy wpływ mają pojemności rozproszenia między przewodami a drzewami, słupami, budynkami itp. Powoduje to możliwość obarczenia obliczeń pewnym błędem, pomimo przyjmowania małej ilości założeń upraszczających – na przykład, co do przestrzennego usytuowania przewodów.

Przyczyną oddziaływania magnetycznego jest pole magnetyczne, wytworzone przez prądy płynące w przewodach toru 2. W wyniku sprzężenia poprzez indukcyjności wzajemne (rys. 3) wzdłuż przewodów fazowych toru 1 indukowane są siły elektromotoryczne E_1, E_2, E_3 , których wartości zależne są od prądów roboczych w przewodach toru 2, wzajemnego przestrzennego usytuowania przewodów i długości odcinka zbliżenia. Istotne jest również redukcyjne oddziaływanie uziemionych przewodów odgromowych i sąsiednich obiektów przewodzących prąd. W przypadku obustronnego uziemienia przewodów toru 1, w utworzonych wówczas pętlach ziemnopowrotnych płyną prądy I_1, I_2, I_3 , o wartościach wynikających z wielkości indukowanych sił elektromotorycznych oraz impedancji własnych pętli ziemnopowrotnych.

Metody teoretyczne analizy oddziaływań magnetycznych ściśle związane są z teorią obwodów ziemnopowrotnych [1, 3]. Złożoność zagadnienia uniemożliwia jednak uwzględnienie wszystkich istotnych czynników – szczególnie niejednorodności gruntu – co powoduje, że pomimo niejednokrotnie znacznego zaawansowania matematycznego, praktycznie wszystkie metody obliczeń są metodami przybliżonymi [2, 4].



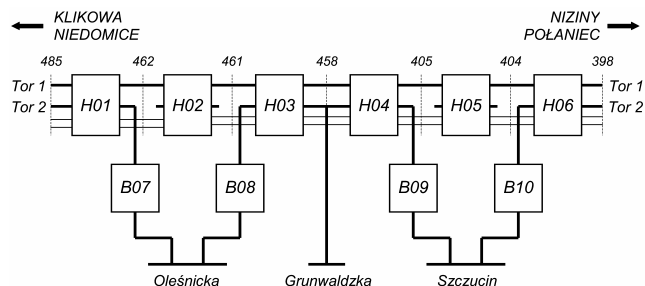
Rys.3. Schemat zastępczy oddziaływania magnetycznego M_{ij} – indukcyjności wzajemne $i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 8, i \neq j$

Indukowane wskutek sprzężeń pojemnościowych napięcia, są różnicami potencjału przewodu i potencjału ziemi. Odmienne sytuacja przedstawia się w przypadku sprzężeń magnetycznych, gdzie napięcia indukowane mają charakter siły elektromotorycznej E . Z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej, napięcia indukowane można traktować jako napięcia dotykowe, czyli różnice potencjałów między dwoma punktami, z którymi mogą zetknąć się jednocześnie ręce lub ręka i noga człowieka. Sytuacja taka może mieć miejsce w przypadku wykonywania prac

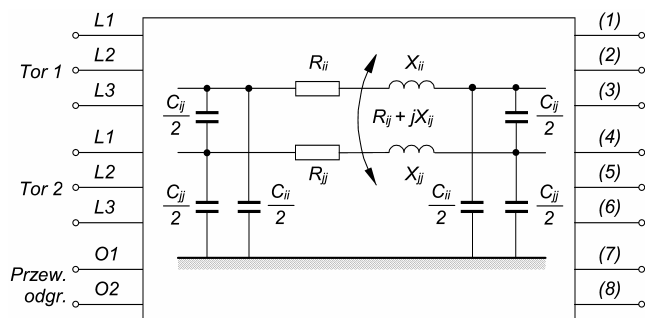
montażowych lub eksploatacyjnych. Z chwilą dotknięcia punktów, pomiędzy którymi występuje napięcie dotykowe, przez ciało człowieka płynie prąd rażenia, a na jego impedancji pojawia się napięcie rażeniowe. Na ogół pomija się niewielką reaktancję ciała ludzkiego i przy analizie warunków bezpieczeństwa dla napięć i prądów o częstotliwości sieciowej przyjmuje się $Z_{cz} = R_{cz} = 1 \text{ k}\Omega$. Również pomija się występujące ewentualnie w obwodzie rażenia inne rezystancje, jak np. rezystancję zwykłego obuwia, rezystancji stanowiska R_{st} i rezystancję uziemienia R_{uz} , wprowadzając tym samym dodatkowy margines bezpieczeństwa.

Dla układu linii 220kV kV Klikowa-Niziny i 110kV Klikowa-Połaniec (rys. 1) opracowano model dla programu komputerowego *EMTP-ATP*. W programie odwzorowano analizowany układ, którego strukturę blokową dla fragmentu zawartego między słupami nr 398 a 485 przedstawia rysunek 4. Istotną cechą programu *EMTP-ATP*, szczególnie predysponującą go do analizy oddziaływań elektromagnetycznych w rozpatrywanym zagadnieniu, są zaimplementowane modele linii napowietrznych [5, 6]. Strukturę takiego modelu dla odcinka dwutorowej linii na słupach serii H, przedstawia rysunek 5.

Dla rozważanych oddziaływań o częstotliwości sieciowej, wystarczające jest przyjęcie modelu w postaci sprzężonych pojemnościowo i magnetycznie czwórników typu II, których parametry określone są przez program na podstawie typowych danych konstrukcyjnych linii. Dodatkową i bardzo istotną zaletą jest łatwość odwzorowania oraz symulacji normalnych i awaryjnych stanów eksploatacyjnych (na przykład stanów zwarciovych), co prowadzi do efektywnego i wiarygodnego oszacowania spodziewanych napięć i prądów indukowanych.



Rys.4. Schemat blokowy fragmentu modelu dla programu *EMTP-ATP* układu z rysunku 1: H – modele linii dwutorowych, ośmioprzewodowych, na słupach serii H, B – modele linii jednotorowych, pięcioprzewodowych, na słupach serii B



Rys.5. Model odcinka dwutorowej, ośmioprzewodowej linii na słupach serii H w postaci sprzężonych pojemnościowo i magnetycznie czwórników typu II

Badania oddziaływań w układzie rzeczywistym

Weryfikacja poprawności opracowanego modelu matematycznego została dokonana poprzez porównanie otrzymanych wartości obliczeniowych z wielkościami

zmierzonymi w układzie rzeczywistym. Zakres badań obejmował pomiary napięć i prądów indukowanych w torze 1 w wyniku oddziaływania pojemnościowego i magnetycznego toru 2.

Badanie oddziaływań pojemnościowych przeprowadzono po zdemontowaniu stałych uziemień toru 1 na słupie nr 485 od strony słupa 484 oraz na słupie nr 398. Żartobliwie można stwierdzić, że ten etap pracy został „ułatwiony” w wyniku wcześniejszej kradzieży mostków uziemiających na słupie nr 398. Pomiary oddziaływań magnetycznych przeprowadzono z kolei po założeniu trwałych uziemień toru 1 na słupie nr 398.

Pomiary indukowanych napięć i prądów przeprowadzono na stanowisku przy słupie nr 485, na którym zainstalowano uziemnik pomiarowy w postaci odłącznika średniego napięcia. Do pomiarów napięć przy oddziaływaniu pojemnościowym stosowano kilowoltomierz elektrostatyczny typu C196, a napięcia niskie mierzono przy zastosowaniu multimetru cyfrowego. Pomiary prądów wykonano wykorzystując wielozakresowy amperomierz laboratoryjny typu LE-3P oraz wstępnie przy użyciu amperomierza cęgowego typu PK 210. Rezystorem rozładowniczym przy pomiarach prądów był rezystor 1 kΩ. W trakcie wykonywania badań rejestrowane było zarówno napięcie toru 2, jak i również jego obciążenie. Na czas pomiarów wymuszono w torze oddziałującym jednokierunkowy przepływ energii od stacji Klikowa, przez odłączenie zasilania od strony stacji Połaniec w GPZ Szczucin. Otrzymane wyniki badań poszczególnych oddziaływań przedstawiono w tabeli 1, w której zawarto również wyniki obliczeń otrzymane przy zastosowaniu modelu opracowanego dla programu *EMTP-ATP*.

Tabela 1. Zmierzone i obliczone wartości napięć i prądów

Wielkość	Faza	ODDZIAŁYWANIE			
		POJEMNOŚCIOWE ¹⁾		MAGNETYCZNE ²⁾	
		pomiar	obliczenia	pomiar	obliczenia
Napięcie względem ziemi przewodów fazowych toru nr 1	L1	1,50 kV	2,04 kV	21 V	23 V
	L2	2,80 kV	3,35 kV	23 V	31 V
	L3	7,70 kV	8,90 kV	45 V	65 V
Prąd doziemny płynący w przewodach fazowych toru nr 1, po uziemieniu ich na stanowisku pomiarowym (słup nr 485)	L1	0,10 A	0,07 A	0,88 A	0,48 A
	L2	0,18 A	0,14 A	1,20 A	0,88 A
	L3	0,52 A	0,57 A	2,30 A	3,23 A
Prąd doziemny płynący przez rezystor uziemiający o wartości $R = 1 \text{ k}\Omega$	L2	0,10 A	0,13 A	15 mA	23 mA
	L2	0,18 A	0,22 A	19 mA	31 mA
	L3	0,52 A	0,59 A	37 mA	55 mA

¹⁾ zdemontowane mostki uziemiające tor 1 na słupach nr 398 i 485
²⁾ zdemontowane mostki uziemiające tor 1 na słupie nr 485; zamontowane mostki na słupie nr 398

Analiza warunków eksploatacyjnych

Przeprowadzone badania potwierdziły użyteczność opracowanego modelu i możliwość jego zastosowania w dalszej analizie, mającej na celu określenie:

- średnich rocznych wartości napięć i prądów rażenia w przewodach fazowych toru nr 1 linii Klikowa-Niziny,
- średnich rocznych strat mocy i energii w przewodach fazowych toru nr 1 linii Klikowa-Niziny,

— wartości indukowanych magnetycznie prądów w przewodach fazowych toru nr 1 dla wybranych przypadków zwarć w torze nr 2.

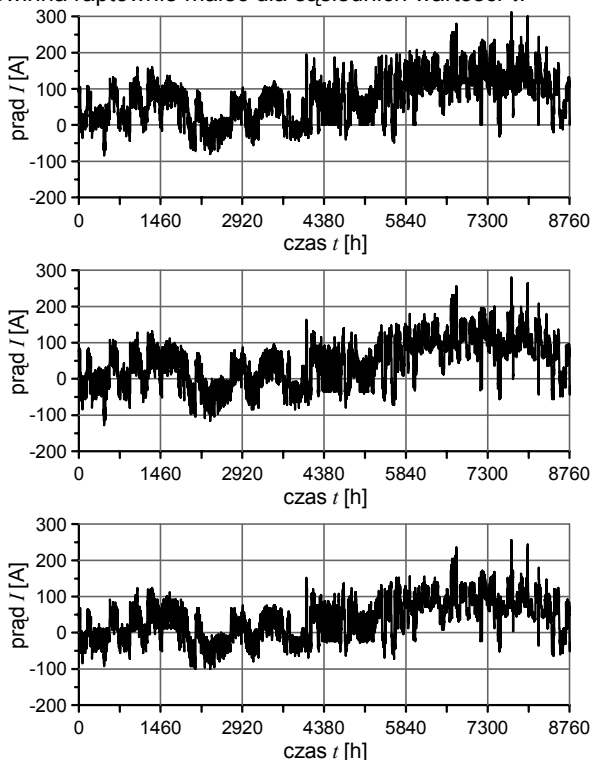
Warunkiem niezbędnym dla realizacji powyższego zadania jest znajomość wielkości statystycznych (wartości średnich, rozkładów itd.) związanych z prądami obciążenia w torze pracującym. W tym celu dokonano analizy rocznych zmian wartości obciążeń w kilku kolejnych latach na poszczególnych odcinkach linii nr 2.

Przebiegi jednego z rocznych obciążeń toru nr 2 relacji Klikowa-Niziny dla wybranych odcinków przedstawiono na rysunku 6. Dla zbadania wzajemnych relacji pomiędzy zmianami obciążeń na poszczególnych odcinkach, dokonano analizy korelacyjnej tych przebiegów. Dla sygnałów rzeczywistych o ograniczonej mocy średniej funkcja korelacji jest zdefiniowana jako:

$$(1) \quad R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau)dt$$

gdzie: $R_{xy}(\tau)$ – funkcja korelacji sygnałów $x(t)$ i $y(t)$;
 τ – przesunięcie czasowe.

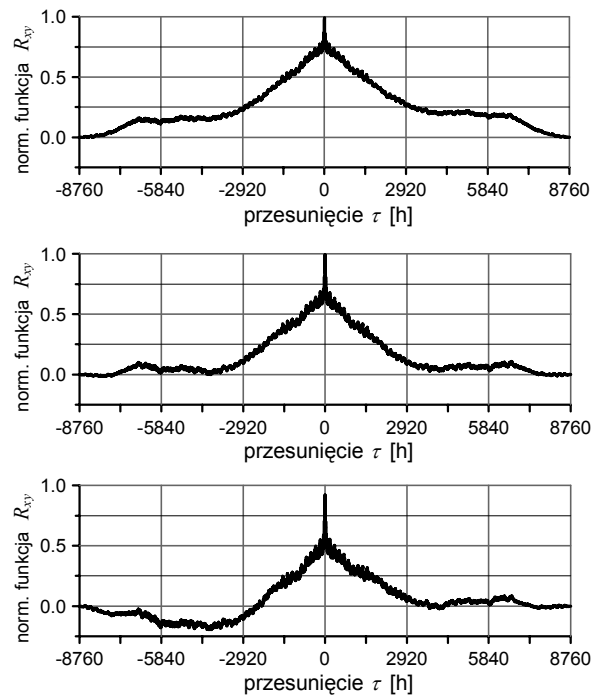
Jeżeli $x(t) = y(t)$ wówczas obliczana jest funkcja autokorelacji sygnału $R_{xx}(\tau)$, jeżeli zaś sygnały są różne, wówczas rezultatem obliczeń jest funkcja korelacji wzajemnej $R_{xy}(\tau)$. Dla sygnałów ograniczonych w czasie może ona być obliczana na dwa sposoby: z założeniem powtarzalności korelowanych przebiegów oraz bez takiego założenia [7]. W każdym z przypadków przy dobrym skorelowaniu przebiegów tutaj analizowanych funkcja korelacji wzajemnej winna osiągać swoje maksimum dla przesunięcia $\tau = 0$ i nie powinna raptownie maleć dla sąsiednich wartości τ .



Rys.6. Roczne obciążenie wybranych odcinków linii 110 kV: a) Połaniec-Szczucin, b) Szczucin-Oleśnicka, c) Oleśnicka-Niedomice

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi znormalizowanych funkcji korelacji wzajemnych dla obciążeń rocznych wybranych odcinków linii 110 kV. Analiza tych przebiegów potwierdza występowanie wzajemnej zależności, wskazując równocześnie na obecność pewnej składowej o charakterze przypadkowym, co wynika z dwóch przyczyn. Po pierwsze,

w analizowanych torach znajdują się odprawy, które w naturalny sposób zaburzają korelacje pomiędzy przebiegami czasowymi obciążeń kolejnych odcinków. Są to: odczep do stacji Grunwaldzka oraz odprawy na stacjach. Po drugie, analiza sposobu rejestracji danych ujawniła, że polega on na zapisie w ciągu godziny czterech wartości chwilowych, pobieranych przez systemy akwizycji na poszczególnych stacjach. Systemy te nie są jednak zsynchronizowane i mogą pobierać próbki sygnałów z pewnym rozmyciem czasowym. Pomimo to, z przebiegów funkcji korelacji wynika, że wartości obciążeń w poszczególnych odcinkach toru są zmiennymi zależnymi, co ma znaczenie dla analiz statystycznych.



Rys.7. Normalizowane funkcje korelacji wzajemnych wybranych przebiegów rocznych obciążeń odcinków linii 110kV:

- a) Połaniec-Szczucin/Szczucin-Oleśnicka;
- b) Szczucin-Oleśnicka/Oleśnicka-Niedomice;
- c) Oleśnicka-Niedomice/Niedomice-Klikowa.

W tabeli 2 zawarto wyniki analizy napięć indukowanych w poszczególnych fazach toru 1, prądów indukowanych i prądów rażenia, otrzymane dla najwyższego dopuszczalnego napięcia roboczego wynoszącego 123 kV oraz średnich obciążeń rocznych w torze 2. Rozpatrzono trzy warianty eksploatacyjne:

- wariant I – obustronne uziemienie toru 1 na słupach nr 398 i nr 485,
- wariant II – jednostronne uziemienie toru 1 na słupie nr 398 albo nr 485,
- wariant III – tor 1 nieuziemiony.

Tabela 2. Średnie roczne indukowanych napięć i prądów rażenia

Wielkość	Faza	Wariant I	Wariant II	Wariant III
Napięcie względem ziemi przewodów fazowych toru nr 1	L1	–	47 V	2093 V
	L2	–	65 V	3442 V
	L3	–	136 V	9158 V
Prądy indukowane w obustronnie uziemionych przewodach toru nr 1	L1	0,360 A	–	–
	L2	1,368 A	–	–
	L3	7,506 A	–	–
Prądy rażenia przy nieuziemionym końcu toru nr 1	L1	–	47 mA	132 mA
	L2	–	65 mA	222 mA
	L3	–	135 mA	612 mA

W tabeli 3 przedstawiono wyniki obliczeń średnich rocznych strat mocy i energii w torze 1, wynikających ze sprzężenia z torem 2. Dla porównania w tabeli 3 zawarto również oszacowane straty w przewodach odgromowych na odcinku pomiędzy słupami nr 398 i 485. Przeprowadzona analiza wykazała ponadto, że wprowadzenie dodatkowego uzziemienia przewodów fazowych toru nr 1 nie powoduje istotnych zmian strat mocy i energii w analizowanym odcinku linii.

W tabeli 4 przedstawiono obliczone wartości prądów przewodach fazowych obustronnie uzziemionego toru nr 1, w warunkach przepływu prądów zwarciovych w torze nr 2. Zaprezentowane wyniki dotyczą zwarć trójfazowych, dwufazowych, dwufazowych z udziałem ziemi oraz jedno-fazowych, występujących na słupie nr 485 analizowanego układu.

Tabela 3. Średnie roczne straty mocy i energii w torze 1 wskutek sprzężenia z torem 2

Przewód	Straty mocy	Straty energii
Faza L1 toru 1	2 W	18 kWh
Faza L2 toru 1	28 W	245 kWh
Faza L3 toru 1	722 W	6325 kWh
Suma strat w torze 1	752 W	6588 kWh
Przewód odgromowy O1	3 W	26 kWh
Przewód odgromowy O2	11 W	97 kWh
Suma strat w przewodach odgromowych	14 W	123 kWh
Całkowite straty w torze 1 i przewodach odgromowych	766 W	6711 kWh
Stosunek strat w torze 1 do strat w przewodach odgromowych	53,6	

Tabela 4. Wartości prądów indukowanych w obustronnie uzziemionym odcinku toru 1 w warunkach przepływu prądów zwarciovych w torze 2

Zwarcie	Prąd I_k''	Faza L1	Faza L2	Faza L3
trójfazowe	2775 A	20 A	55 A	248 A
dwufazowe	L1 – L3	10 A	33 A	202 A
	L2 – L3	3 A	26 A	165 A
	L1 – L2	8 A	10 A	44 A
dwufazowe z udziałem ziemi	L1 – L3	148 A	160 A	250 A
	L2 – L3	159 A	191 A	392 A
	L1 – L2	168 A	176 A	321 A
jednofazowe	L1	210 A	218 A	307 A
	L2	212 A	228 A	344 A
	L3	218 A	253 A	471 A

Podsumowanie

W analizowanym układzie linii Klikowa-Niziny i Klikowa-Połaniec występują oddziaływania elektromagnetyczne w postaci sprzężeń pojemnościowych oraz sprzężeń magnetycznych. W chwili obecnej normalnym układem eksploatacji jest rozmostkowanie toru Klikowa-Niziny na

słupach nr 485 i nr 398 oraz obustronne uzziemienie końców przewodów roboczych. W tej sytuacji występuje praktycznie tylko oddziaływanie magnetyczne, w wyniku którego w zamkniętych pętach ziemnopowrotnych przewodów fazowych płyną prądy indukowane.

Oddziaływanie magnetyczne i indukowanie prądów w torze Klikowa-Niziny jest przyczyną dodatkowych strat energii elektrycznej, przy czym odziemienie tylko jednego z końców toru Klikowa-Niziny (na słupie nr 485 albo słupie nr 398) eliminuje to zjawisko. Jednocześnie istotnej zmianie ulegają warunki eksploatacyjne, w wyniku czego pojawia się dodatkowe zagrożenie porażeniowe. Odziemienie obu końców toru Klikowa-Niziny (na słupie nr 485 i słupie nr 398) eliminuje całkowicie oddziaływanie magnetyczne (w tym związane z nim straty energii), lecz jednocześnie uwidacznia się oddziaływanie pojemnościowe, a indukowane napięcia stwarzają istotne zagrożenie porażeniowe.

Przeprowadzona analiza wykazała również, że w eksploatacji toru Klikowa-Niziny musi być brane pod uwagę również oddziaływanie magnetyczne prądów zwarciovych w torze Klikowa-Połaniec, szczególnie w przypadku zwarć jednofazowych i dwufazowych z udziałem ziemi.

Ze względu na analizowane oddziaływania oraz zbliżenia i skrzyżowania z innymi liniami, przy prowadzeniu eksploatacji linii 220 kV relacji Klikowa-Niziny należy stosować wymagania określone dla prac przy liniach krzyżowanych, zbliżających się i wielotorowych.

W związku z ograniczoną możliwością pozyskania nowych korytarzy dla budowy obiektów liniowych, zagadnienie wzajemnego oddziaływania linii elektroenergetycznych będzie w przyszłości odgrywało coraz większe znaczenie. Alternatywą jest rozbudowa urządzeń i wykorzystanie istniejących tras do tworzenia linii wielotorowych o różnych poziomach napięcia, zawieszonych na wspólnych konstrukcjach wsporczych.

LITERATURA

- [1] Krakowski M.: Obwody ziemnopowrotne. *WNT*, Warszawa 1980
- [2] Nowak W.: Model analityczno-numeryczny oddziaływania linii wysokiego napięcia na sieć trakcji kolejowej. *Rozprawa doktorska*, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 1995
- [3] Piłatowicz A.: Oddziaływanie obwodów elektroenergetycznych na obwody telekomunikacyjne. *WNT*, Warszawa 1975
- [4] Szymański G.: Symulacja cyfrowa niebezpiecznych oddziaływań stacji i linii wysokich napięć. *Wyd. Politechniki Poznańskiej*, Poznań 1998
- [5] *Alternative Transients Program. Rule Book*. Canadian/American EMTP User Group, 1987–92
- [6] *Electromagnetic Transients Program. Theory Book*. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 1995
- [7] Baher H., Analog and digital signal processing, *John Wiley*, New York, 1992

Autorzy:

dr inż. Wiesław Nowak, e-mail: wiesio@agh.edu.pl; mgr inż. Rafał Tarko, e-mail: rtarko@agh.edu.pl; dr inż. Paweł Zydroń, e-mail: pyzdron@agh.edu.pl Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
mgr inż. Andrzej Jaglarz, e-mail: andrzej.jaglarz@tarnow.enion.pl, mgr inż. Jan Kozioł, e-mail: jan.koziol@tarnow.enion.pl, ENION S.A., Oddział w Tarnowie, Zakład Energetyczny Tarnów, ul. Lwowska 72 – 96b, 33-100 Tarnów