

Autoreferat

Jacek Andrzej Klucznik

Zawartość autoreferatu

1. Dyplomy i stopnie naukowe	1
2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu	2
3. Wskazanie osiągnięcia naukowego	3
4. Omówienie celu naukowego osiągnięcia i uzyskanych wyników	4
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych	19
6. Omówienie osiągnięć dydaktycznych i organizacyjnych	26

1. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

<p>1.</p> <p>Magister inżynier</p> <p>Kierunek elektrotechnika</p> <p>Specjalność elektroenergetyka</p>	<p>Wydział Elektrotechniki i Automatyki</p> <p>Politechniki Gdańskiej,</p> <p>Gdańsk, 1999 r.</p>
<p>2.</p> <p>Doktor nauk technicznych</p> <p>Dyscyplina: elektrotechnika</p>	<p>Wydział Elektrotechniki i Automatyki</p> <p>Politechniki Gdańskiej,</p> <p>Gdańsk, 2004 r.</p> <p>Tytuł rozprawy doktorskiej: „Optymalizacja lokalizacji i parametrów stabilizatorów systemowych”.</p> <p>Promotor: prof. dr hab. Zbigniew Lubośny</p> <p>Rozprawa została wyróżniona przez Radę Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG</p>

2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

od 01.07.2017 Starszy wykładowca	Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska,
od 01.10.2004 Adiunkt	Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska,
od 01.04.2004 Asystent	Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska,

3. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

Tytuł osiągnięcia naukowego:

Obliczanie wartości prądów w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych

Osiągnięcie naukowe stanowią:

1. Monografia

J. Klucznik, Obliczanie wartości prądów w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych, rok wydania 2017, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, ISBN 978-83-7348-701-7

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubośny,
Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej

prof. dr hab. inż. Marian Sobierajski,
Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej

2. Publikacja

J. Klucznik, Earth wires currents calculation by tableau analysis, Electric Power Systems Research, Volume 151, 2017, Pages 329-337, DOI: 10.1016/j.epsr.2017.06.001.

4. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Podjęta przeze mnie tematyka naukowa pt.: „Obliczanie wartości prądów w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych” dotyczy bardzo ważnego aspektu projektowania, eksploatacji i modernizacji linii elektroenergetycznych jakim jest dobór przewodów odgromowych.

Przewody odgromowe stanowią obok konstrukcji wsporczych (słupów) i przewodów fazowych ważną część linii elektroenergetycznej. Podstawowym celem ich instalowania jest zapewnienie ochrony dla przewodów fazowych przed bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi. Jednak wpływ przewodów odgromowych na linię nie ogranicza się jedynie do zapewnienia ochrony odgromowej. Przewody odgromowe także biorą udział w przepływie prądów zwarciovych w czasie zwarć doziemnych oraz wpływają na skuteczność ochrony przeciwporażeniowej linii. Prądy płynące w przewodach odgromowych przy zwarciach mogą osiągać znaczne wartości. Powoduje to powstawanie szeregu zagrożeń, które nie występują w czasie normalnej pracy linii elektroenergetycznej.

Podstawowym zagrożeniem jest wzrost temperatury przewodu na skutek nagrzewania go przez przepływający prąd zwarciovoy. Zagrożenie to jest bardzo realne, ponieważ przekrój przewodów odgromowych jest znacznie mniejszy niż przewodów fazowych. Prąd wyładowania atmosferycznego, mimo znacznej wartości, oddziałuje na przewód odgromowy przez krótki czas, zatem efekt cieplny przepływu prądu wyładowania atmosferycznego jest stosunkowo niewielki. Nie stanowi on zagrożenia cieplnego dla stosowanych w liniach 220 i 400 kV typowych przewodów odgromowych. Natomiast czasy trwania typowych zwarć wynoszą od 60 do 120 ms przy działaniu zabezpieczeń podstawowych oraz do 500 ms przy działaniu zabezpieczeń rezerwowych. Są to więc czasy znacznie dłuższe niż czas trwania wyładowania atmosferycznego, przez co efekt cieplny przepływu prądu zwarciovoy jest znacznie większy od skutków cieplnych wyładowania atmosferycznego. Dodatkowo, stosowanie automatyki samoczynnego ponownego załączenia (SPZ) może powodować po krótkiej przerwie (trwającej do 2 s) ponowny przepływ prądu zwarciovoy przez przewody odgromowe w przypadku gdy zwarcie nie było zwarciem przemijającym. Powyższe powoduje, że to prąd zwarciovoy a nie prąd wyładowania atmosferycznego płynący w przewodach odgromowych jest głównym czynnikiem brany pod uwagę przy projektowaniu ochrony odgromowej linii i doborze przewodów odgromowych.

Drugim zagrożeniem związanym z przepływem części prądu zwarciovoy przez przewody odgromowe jest zwiększenie zagrożenia porażenia prądem elektrycznym. Zwarcie doziemne występujące na dowolnym słupie linii elektroenergetycznej powoduje na skutek przepływu prądu przez uziom tego słupa wzrost napięcia dotykowego oraz napięcia krokowego w otoczeniu słupa stanowiącego bezpośrednie zagrożenie dla przebywających tam ludzi czy zwierząt. Ponadto, na skutek połączenia wszystkich słupów linii przewodami odgromowymi, część prądu zwarciovoy płynie także przez uziomy pozostałych słupów linii i powoduje wzrost ich potencjału. Skutkuje to „rozsianiem” zagrożenia porażeniowego wzdłuż całej linii dotkniętej zwarciem.

Powyższe dwa czynniki powodują, że konieczne jest precyzyjne określenie wartości prądów płynących w przewodach odgromowych i uziomach słupów przy zwarciach doziemnych. Pozwala to na prawidłowe dobranie przewodów odgromowych pod kątem ich

wytrzymałości cieplnej i daje możliwość skuteczności ochrony przeciwporażeniowej linii elektroenergetycznej, co przekłada się na bezpieczeństwo pracy linii elektroenergetycznej, a tym samym na bezpieczeństwo pracy całego systemu elektroenergetycznego.

Problem obliczania rozptyłu prądów w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych nie jest nowy i pojawia się w publikacjach naukowych od ponad pięćdziesięciu lat. Liczba prac, które powstały w tej dziedzinie jest znaczna, co świadczy o bardzo dużym praktycznym znaczeniu problemu i jednoczesnej chęci doskonalenia istniejących metod obliczeniowych. Część istniejących metod obliczeniowych oparto o równania różnic skończonych [1], [2]. Aby możliwe było ich wykorzystanie autorzy przyjmują, że linia jest dostatecznie długa, aby traktować ją jako linię o nieskończonej długości. Ponadto konieczne wówczas staje się przyjęcie założeń upraszczających, że wszystkie przęsła charakteryzują się jednakową długością i jednakowymi parametrami (takie same wartości impedancji własnej i wzajemnej, takie same wartości rezystancji uziemienia wszystkich słupów). Dla linii, które nie mogą być traktowane jako linie nieskończenie długie, w pracy [3] zaproponowano wprowadzanie dodatkowych współczynników korekcyjnych. Część z publikacji prezentujących problematykę obliczeń prądów w przewodach odgromowych wykorzystuje do tego celu teorię odwodów drabinkowych [4]–[6]. Innym podejściem do problemu jest wykorzystanie tzw. dwustronnej eliminacji, co prezentowane jest w publikacji [7]. Metoda eliminacji dwustronnej stała się jedną z powszechnie wykorzystywanych metod obliczeniowych, zwłaszcza w Stanach Zjednoczonych, gdzie jej stosowanie jest zalecane przez organizacje IEEE oraz EPRI.

Interesujące podejście do problemu zaprezentowano w pracy [8]. W swojej metodzie autorzy proponują sposób postępowania w celu obliczenia początkowego prądu zwarciego dla zwarcia na dowolnym słupie linii napowietrznej polegający na przekształcaniach schematu linii przez „zwijanie” schematu od stacji krańcowych linii do miejsca zwarcia. Następnie wykonywane są obliczenia rozptyłu prądu zwarciego w poszczególnych przęsłach linii przez „rozwijanie” schematu. Jednak oryginalny referat prezentuje sposób postępowania dla linii łączącej jedynie dwie stacje, co jest jej istotnym ograniczeniem.

Współczesne poszukiwania metod obliczania wartości prądów w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych skupiają się na rozszerzeniu funkcjonalności metod istniejących. Przykładem jest praca [9], w której autorzy modyfikują metodę eliminacji dwustronnej pozwalając na analizę rozptyłu prądów w układzie zawierającym dwa osobne przewody odgromowe. Dalej jednak metoda jest ograniczona do linii łączącej jedynie dwie stacje elektroenergetyczne. Z kolei w pracy [10] autorzy proponują metodę pozwalającą na analizę złożonego układu sieciowego, zawierającego w prezentowanym przykładzie pięć stacji elektroenergetycznych i cztery linie elektroenergetyczne, jednak nie dają możliwości analizy układu z dwoma przewodami odgromowymi, a linie elektroenergetyczne modelowane są w sposób uproszczony – jednofazowo.

W Polsce rozpowszechniony jest program MeLinet [11] służący do doboru przewodów odgromowych linii napowietrznych. Obliczenia wykonywane przez ten program oparte są o uproszczony model linii łączącej dwie stacje elektroenergetyczne. Uproszczony model linii uwzględnia jeden zastępczy przewód fazowy, którym płynie suma prądów fazowych ($3I_0$) oraz pojedynczy przewód odgromowy. Oba przewody są sprzężone magnetycznie, co odwzorowane jest przez uśrednione wartości impedancji wzajemnej.

Przewód odgromowy jest modelowany, jako n szeregowo połączonych pręseł, uziemionych na końcach przez rezystancję odzwierciedlającą uziemienia kolejnych słupów.

W metodzie zakłada się, że wartości prądów zwarciovych dopływających do miejsca zwarcia od obu stacji są znane a priori, wyznaczone wcześniej na podstawie obliczeń zwarciovych. Zakłada się wówczas w uproszczeniu, że wartość prądu zwarciovego jest stała, niezależna od impedancji przewodów odgromowych i rezystancji uziemienia słupów i stacji wprowadzając do obwodu dwa idealne źródła prądowe reprezentujące udziały obu stacji w prądzie zwarciovym. Następnie znając wartości prądów zwarciovych w przewodzie fazowym oblicza się wartości napięć indukowanych w przewodzie odgromowym w poszczególnych pręsełach. Wówczas, znając wszystkie wymuszenia w obwodzie, rozwiązuje się stosunkowo prosty obwód elektryczny. Stosuje się do tego celu metodę potencjałów węzłowych, przyjmując jako niewiadome wartości napięć uziomowych. Po obliczeniu wartości napięć uziomowych możliwe jest określenie wartości prądów płynących w poszczególnych odcinkach przewodu odgromowego. Podstawowym ograniczeniem stosowanego modelu jest brak możliwości uwzględnienia drugiego przewodu odgromowego oraz brak możliwości wykonywania analiz dla złożonych układów sieciowych.

Powyższy stan wskazuje, że brak jest obecnie metody uniwersalnej, pozwalającej na analizę dowolnych układów sieciowych tj. zawierających wiele linii elektroenergetycznych - jedno i wielotorowych, z jednym lub z dwoma przewodami odgromowymi, łączącymi wiele stacji elektroenergetycznych.

W ostatnich latach w polskim systemie elektroenergetycznym znacząco wzrosła liczba realizowanych prac związanych z budową nowych linii elektroenergetycznych oraz modernizacją linii istniejących. Operator systemu przesyłowego – Polskie Sieci Elektroenergetyczne, odpowiedzialny za utrzymanie i rozbudowę sieci najwyższych napięć, planuje w latach 2016-2025 wybudowanie szeregu nowych stacji elektroenergetycznych oraz modernizację stacji istniejących. Z budową nowych stacji związana jest w naturalny sposób budowa nowych linii elektroenergetycznych. Jednocześnie planowane jest stopniowe zastępowanie istniejących linii 220 kV liniami o napięciu 400 kV. Również sieć dystrybucyjna 110 kV podlega modernizacjom i rozbudowie. Często w ramach modernizacji linii typowe przewody odgromowe AFL (linki stalowo-aluminiowe) zastępowane są przewodami typu OPGW zawierającymi w swoim rdzeniu włókna światłowodowe wykorzystywane do komunikacji i sterowania. Powyższe powoduje, że tematyka właściwego doboru przewodów odgromowych jest obecnie bardzo aktualna.

Tematyka obliczeń prądów w przewodach odgromowych podjęta została przeze mnie w roku 2014. Efektem pierwszych zrealizowanych badań były prace [12], [13]. W pracach tych zaprezentowano propozycję modyfikacji istniejącej metody [8] obliczania rozptyłu prądów zwarciovych w przewodach odgromowych polegającej na przekształcaniach schematu linii przez „zwijanie” schematu od stacji krańcowych linii do miejsca zwarcia. Zaproponowane przeze mnie modyfikacje metody umożliwiły analizę rozptyłu prądów w przewodach odgromowych w układzie gwiazdowym, zawierającym trzy stacje elektroenergetyczne połączone liniami. Dzięki temu znacznie wzrosły możliwości aplikacyjne metody pozwalające na szersze wykorzystanie metody do analizy rzeczywistych układów przesyłowych. Jednak zmodyfikowana metoda ciągle była pozbawiona cech uniwersalności, a jest zastosowanie ograniczone było do jednotorowych linii z jednym przewodem

odgromowym. Chęć przewyciężenia tych ograniczeń zainspirowała mnie do opracowania innej metody obliczania rozptywu prądów w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych.

W swojej monografii zaproponowałem nowatorską metodę obliczania wartości prądów płynących w przewodach odgromowych w czasie zwarć, pozwalającą na dobór przewodów odgromowych pod względem wytrzymałości cieplnej. Proponowana metoda charakteryzuje się większą dokładnością i większą uniwersalnością niż powszechnie stosowane metody, pozwalając tym samym na dobór przewodów odgromowych z mniejszym ryzykiem niepewności. Prezentowana w monografii metoda obliczeniowa pozwala również na ocenę ochrony przeciwporażeniowej linii, poprzez wyznaczenie wartości prądów płynących w uziomach słupów oraz potencjałów słupów w trakcie zwarć doziemnych.

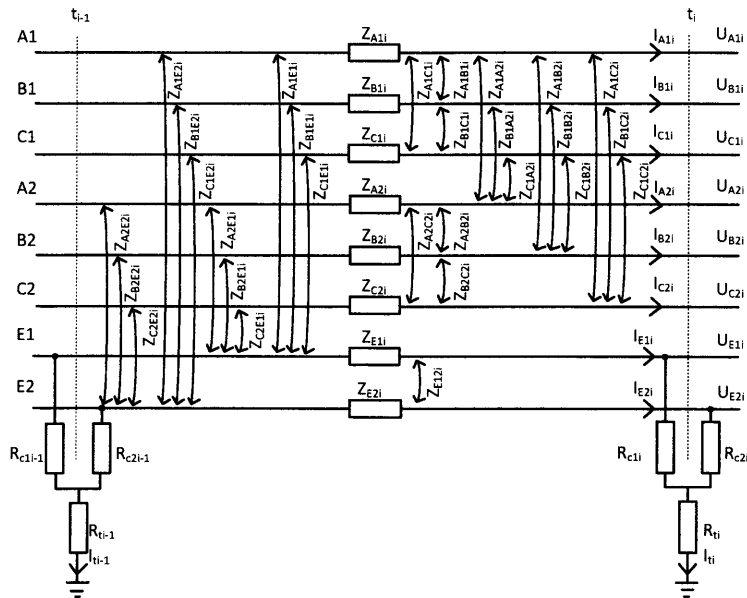
Monografia liczy 125 stron i podzielona jest na siedem rozdziałów.

Wprowadzeniem do rozważanego problemu, zawartym w początkowej części monografii, są równania Carsona będące podstawą do obliczenia parametrów wielofazowych modeli linii elektroenergetycznych. Następnie w pracy dokonano analizy wpływu zmieniającej się wysokości przewodów nad powierzchnią ziemi oraz zmieniających się odległości między przewodami linii na wartości impedancji własnej i wzajemnej przewodów linii. Wskazano, że odległości te, zmieniające się w przęsłach linii ze względu na różną wysokość i różne typy słupów oraz ze względu na zmieniający się zwis przewodów, mają istotny wpływ na impedancje własne i wzajemne przewodów. Zaprezentowano sposób uśredniania wysokości i wzajemnej odległości przewodów w przęsle, dokonując również analizy błędów do jakich prowadzą zaproponowane uproszczenia.

W rozdziale drugim pracy przedstawione zostały wieloprzewodowe modele napowietrznych linii elektroenergetycznych wykorzystywane następnie w obliczeniach. W monografii szczegółowo zaprezentowano trzy modele: linii jednotorowej z jednym oraz z dwoma przewodami odgromowymi oraz linii dwutorowej z dwoma przewodami odgromowymi. W niniejszym autoreferacie prezentowany jest jeden z modeli (Rys. 1), odwzorowujący przęsło linii dwutorowej z podwójnym przewodem odgromowym. Schemat ten przedstawia pojedyncze przęsło linii (od słupa t_{i-1} do słupa t_i) zawierające trzy przewody fazowe toru pierwszego (A1, B1, C1), trzy przewody fazowe toru drugiego (A2, B2, C2), i dwa przewody odgromowe (E1, E2). Na rysunku, dla zwiększenia przejrzystości, pominięto notyfikację liczb zespolonych przy impedancjach.

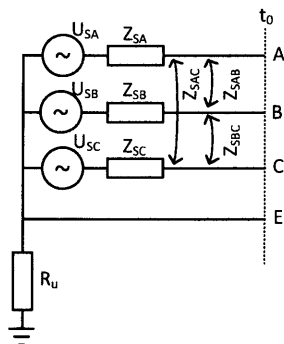
W modelu można wyróżnić pięć grup parametrów: impedancje własne przewodów fazowych Z_{A1i} , Z_{B1i} , Z_{C1i} , Z_{A2i} , Z_{B2i} , Z_{C2i} i przewodów odgromowych: Z_{E1i} , Z_{E2i} , impedancje wzajemne w obrębie danego toru Z_{A1B1i} , Z_{B1C1i} , Z_{A1C1i} , Z_{A2B2i} , Z_{B2C2i} , Z_{A2C2i} impedancje wzajemne pomiędzy torami Z_{A1A2i} , Z_{B1B2i} , Z_{C1C2i} , Z_{A1B2i} , Z_{A1C2i} , Z_{B1A2i} , Z_{B1C2i} , Z_{C1A2i} , Z_{BC1B2i} oraz impedancje wzajemne pomiędzy przewodami fazowymi a przewodami odgromowymi Z_{A1E1i} , Z_{B1E1i} , Z_{C1E1i} , Z_{A2E1i} , Z_{B2E1i} , Z_{C2E1i} , Z_{A1E2i} , Z_{B1E2i} , Z_{C1E2i} , Z_{A2E2i} , Z_{B2E2i} , Z_{C2E2i} . a także impedancję wzajemną pomiędzy przewodami odgromowymi Z_{E1E2i} . Dla każdego słupa, poza wartością rezystancji uziemienia słupa R_{ti} , wprowadza się dodatkowo dwie rezystancje R_{c1i} i R_{c2i} , które odpowiadają rezystancji przejścia pomiędzy przewodem odgromowym a konstrukcją słupa oraz uwzględniają rezystancję słupa pomiędzy wieżyczkami, na których zamocowane są przewody odgromowe. Wprowadzenie tych dodatkowych rezystancji zwiększa uniwersalność modelu: przyjmując zerowe wartości R_{c1i} i R_{c2i} można model

uproszczyć, przyjmując jedną lub obie rezystancje jako wartości dążące do nieskończoności można analizować sytuację, gdy przewód odgromowy celowo lub jako wynik uszkodzenia nie jest połączony z konstrukcją słupa. Z kolei przyjęcie wartości z zakresu od 0,1 do 0,5 Ω powodować będzie zwiększenie dokładności modelu i uzyskanie wyników analiz bliższych rzeczywistości.



Rys. 1. Model przęsla linii dwutorowej, z dwoma przewodami odgromowymi, uwzględniający rezystancję uziemienia słupów

Stosowanie struktury, w której linie elektroenergetyczne modelowane są wielofazowo wymusza zastosowanie modeli stacji elektroenergetycznych w tej samej konwencji. Zaproponowana w monografii struktura modelu stacji (rys. 2) ze źródłem prądu zwarciego zawiera trójfazowe źródło napięcia, którego punkt neutralny uziemiony jest przez rezystancję R_u , odpowiadającą rezystancji uziemienia stacji. Wartości impedancji własnych (fazowych) Z_{SA} , Z_{SB} , Z_{SC} , i wzajemnych (międzyfazowych) Z_{SAC} , Z_{SBC} , Z_{SAB} , wyznaczane są na podstawie wartości zastępczych impedancji zwarciovych dla składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej.

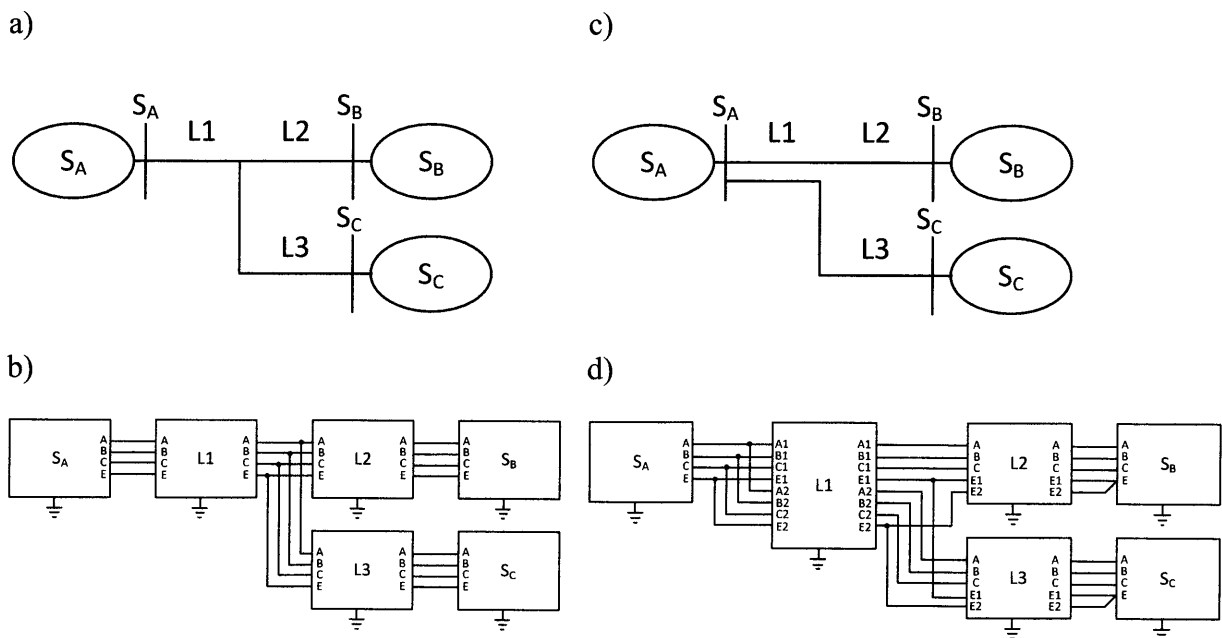


Rys. 2. Trójfazowy model stacji elektroenergetycznej ze źródłem prądu zwarciego

Linia przerywana, oznaczona na rysunku 2 jako t_0 , odpowiada początkowi odchodzącej od stacji linii elektroenergetycznej. Jest to tak zwana bramka liniowa, od której zaczyna się pierwsze przęsło linii elektroenergetycznej. Bramka liniowa połączona jest

z uziomem stacji, a jednocześnie do bramki przyłączone są przewody odgromowe linii. Punkt przyłączenia przewodów odgromowych linii oznaczony jest na schemacie jako E. Oznaczenia A, B, C odpowiadają miejscu przyłączenia przewodów fazowych linii.

Prezentowane modele stacji elektroenergetycznych i linii mogą być łączone ze sobą, tak aby odtworzyć układ odpowiadający fragmentowi analizowanego rzeczywistego systemu elektroenergetycznego. Stosując proponowane w pracy modele możliwe jest odtworzenie praktycznie każdej konfiguracji spotykanej w systemie elektroenergetycznym. Na rysunku 3 pokazano dwa przykłady takich układów sieci.



Rys. 3. Modele sieci elektroenergetycznej a) linia jednorodowa łącząca stacje S_A i S_B , z odczepem do stacji S_C - schemat ideowy jednokreskowy, b) schemat blokowy dla linii z jednym przewodem odgromowym, c) linia dwutorowa, rozdzielająca się w dwie linie jednorodowe, łączące stację S_A ze stacjami S_B i S_C - schemat ideowy jednokreskowy, d) schemat blokowy dla linii z dwoma przewodami odgromowymi

W rozdziale trzecim monografii pracy przedstawiono główne metody obliczania prądów w przewodach odgromowych stosowane do tej pory, wskazując ich wady i ograniczenia, oraz zaprezentowano nowatorskie podejście do zagadnienia obliczania rozptyłu prądów w przewodach odgromowych. W monografii szczegółowo przedstawiono wykorzystanie metody tableau [14] w celu rozwiązania postawionego problemu. Metodę tą wybrano, mimo jej małej popularności w elektrotechnice, bo w łatwy sposób umożliwia analizę obwodów zawierających sprzężenia magnetyczne, a takie występują w zaproponowanym sposobie odzwierciedlenia linii.

Układ równań opisujący analizowaną sieć składa się z trzech równań macierzowych: równania bilansu prądów w węzłach (1) opartego o pierwsze prawo Kirchhoffa, z równania napięć dla oczek (2) opartego o drugie prawo Kirchhoffa oraz z równania gałęziowego uwzględniającego związek pomiędzy prądami a spadkami napięć w gałęziach, uwzględniającego sprzężenia i źródła napięciowe (3).

$$\underline{\mathbf{I}}\mathbf{A}_I = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\underline{\mathbf{U}} - \mathbf{A}_I^T \underline{\mathbf{E}} = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\underline{\mathbf{Z}}\underline{\mathbf{I}} + \mathbf{K}_U \underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{U}}_s \quad (3)$$

gdzie: $\underline{\mathbf{I}}$ – wektor prądów w gałęziach,
 $\underline{\mathbf{U}}$ – wektor spadków napięć w gałęziach,
 $\underline{\mathbf{E}}$ – wektor napięć w węzłach,
 $\underline{\mathbf{U}}_s$ – wektor napięć zasilających,
 \mathbf{A}_I – macierz incydencji,
 \mathbf{A}_I^T – macierz incydencji transponowana,
 $\underline{\mathbf{Z}}$ – macierz impedancji,
 \mathbf{K}_U – macierz współczynników napięciowych.

Przyjmując, że w tworzonym układzie równań sumowanie prądów (1) dotyczy tylko węzłów niezależnych, i podobnie sumowanie napięć (2) dotyczy tylko oczek niezależnych układ będzie miał tylko jedno rozwiązanie. Wartości spadków napięć w poszczególnych gałęziach nie są istotne w analizie dotyczącej rozptywu prądu zwarciovego w linii. Dlatego wyznaczając z zależności (2) wektor spadków napięć w gałęziach i podstawiając go do równania (3), układ równań (1) - (3) można zredukować do postaci (4). Redukcja taka pozwala na istotne zmniejszenie rozmiaru macierzy, która będzie wykorzystywana do znalezienia rozwiązania układu.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_I & \mathbf{0} \\ \underline{\mathbf{Z}} & \mathbf{K}_U \mathbf{A}_I^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}} \\ \underline{\mathbf{E}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \underline{\mathbf{U}}_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

Wektor nieznanych prądów $\underline{\mathbf{I}}$ oraz napięć w węzłach $\underline{\mathbf{E}}$ jest wyznaczany z zastosowaniem procedur algebry liniowej. Wymuszeniem w układzie jest wektor napięć $\underline{\mathbf{U}}_s$ w stacjach zasilających analizowaną sieć.

W wyniku rozwiązania układu równań (4) uzyskuje się następujące wartości:

- początkowy prąd zwarciovowy,
- prądy płynące w przewodach odgromowych w poszczególnych przęsłach,
- prądy płynące w uziomach poszczególnych słupów,
- prądy płynące w przewodach fazowych w poszczególnych przęsłach,
- napięcia dotykowe na poszczególnych słupach.

Nowo proponowana, autorska metoda obliczeniowa może być łatwo implementowana w dowolnym języku programowania. Przy tworzeniu monografii do implementacji metody obliczeniowej wykorzystano środowisko Freemath, odpowiadające pod względem funkcjonalności, w wykorzystanym zakresie, komercyjnemu oprogramowaniu Matlab. W monografii zaprezentowano wiele praktycznych uwag dotyczących implementacji metody.

W rozdziale trzecim monografii zaprezentowano też przykłady obliczania rozptywu prądów w przewodach odgromowych dla kilku różnych typów i konfiguracji linii elektroenergetycznych. Rozważane były linie zasilane dwustronnie: linie jednotorowe z jednym lub dwoma przewodami odgromowymi oraz linie dwutorowe z dwoma przewodami

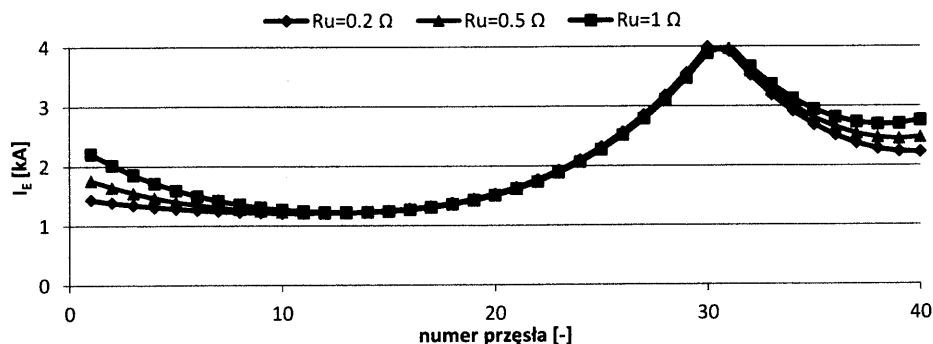
odgromowymi. Analizowane były także układy nietypowe – np. układ gwiazdowy (Rys. 3a), czy linia dwutorowa rozdzielająca się w dwie linie jednotorowe (Rys. 3c). Rozważane były również linie z przewodami odgromowymi, z których jeden jest standardowym przewodem stalowo-aluminiowym (AFL), a drugi jest przewodem zawierającym w swoim rdzeniu włókna światłowodowe (OPGW).

Wszystkie przedstawione w monografii przykłady są bogato ilustrowane wykresami oraz szeroko opisywane. Na ich podstawie sformułowano ogólne wnioski dotyczące rozptyłu prądów w przewodach odgromowych przy zwarciach jednofazowych. Wnioski te syntetycznie prezentowane są poniżej. Część z prezentowanych w niniejszym autoreferacie wniosków jest wyczuwalna intuicyjnie, lub prezentowana w innych publikacjach. Należy jednak podkreślić, że głównym celem i osiągnięciem w przedstawionym w monografii jest nowa, uniwersalna metoda obliczania rozptyłu prądów w przewodach odgromowych. Nie mniej jednak prezentowane wnioski potwierdzają z jednej strony poprawność proponowanej metody obliczeniowej, a z drugiej strony systematyzują opis zjawisk związanych z rozptyłem prądów zwarciovych w przewodach odgromowych:

- Największe wartości prądów w przewodach odgromowych spodziewane są w przęśle odchodzącym od słupa, na którym wystąpiło zwarcie.
- Wartości prądów zwarciovych płynących w przewodach odgromowych zależą od lokalizacji przewodu fazy zwartej względem przewodów odgromowych.
- W miarę oddalania się od miejsca zwarcia wartości prądu w przewodzie odgromowym maleją, co spowodowane jest wpływem części prądu zwarciovego przez uziomy kolejnych słupów do ziemi.
- Największe wartości prądów płynących przez uziemienia słupów do ziemi obserwuje się w uziemiu słupa, na którym wystąpiło zwarcie oraz w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Wartości prądów płynących przez uziomy słupów maleją w miarę odsuwania się od miejsca zwarcia.
- Powyższe powoduje, że prądy w przewodach odgromowych osiągają w pewnym oddaleniu od miejsca zwarcia (zwykle jest to 10-20 przęseł) wartości charakteryzujące się niewielką zmiennością, prądy w przewodach odgromowych ustalają się.
- W pobliżu do stacji elektroenergetycznych może następować ponowny wzrost prądu zwarciovego w przewodach odgromowych. Zjawisko to związane jest ze zmianą kierunku przepływu prądu w uziomach słupów w pobliżu stacji. Skala obserwowanego zjawiska zależy od wzajemnych relacji pomiędzy rezystancją uziemienia stacji i uziemienia słupów, a także, choć w mniejszym stopniu, od impedancji przewodów w przęślach.

Przykład ilustrujący zjawisko wzrostu prądu w przewodach odgromowych, w przęślach w pobliżu stacji przedstawiony jest na rysunku 4. W przykładzie rozważano linię 110 kV o długości 12 km łączącą dwie stacje elektroenergetyczne. W analizowanym przypadku założono, że zwarcie jednofazowe wystąpiło na słupie 30. Wykres wykonano dla trzech różnych wartości rezystancji uziemienia stacji: 0,2 Ω , 0,5 Ω oraz 1 Ω . Im większa jest wartość rezystancji uziemienia stacji, tym większa część prądu zwarciovego płynącego ziemią „wraca” przez uziomy słupów do przewodu odgromowego. Efekt ten widoczny jest

tylko w pobliżu stacji. W większej odległości od stacji wartość rezystancji uziemienia stacji pozostaje bez wpływu na prądy płynące w uziomach słupów i w przewodzie odgromowym.



Rys. 4 Przykład wpływu rezystancji uziemienia stacji na wartości prądów płynących w przewodzie odgromowym jednotorowej linii 110 kV z jednym przewodem odgromowym, przy zwarciu jednofazowym

W rozdziale czwartym monografii zawarto ocenę dokładności proponowanej metody obliczeniowej. W tym celu dokonano analizy rozptyłu prądu zwarciovego w przykładowej linii elektroenergetycznej trzema metodami: wykorzystując metodę autorską, wykorzystując komercyjne oprogramowanie PowerFactory oraz wykorzystując metodę opartą o uproszczony model linii elektroenergetycznej¹ używaną w programie MeLiNet, powszechnie stosowanym w Polsce przy projektowaniu linii elektroenergetycznych. Podkreślenia wymaga fakt, że oprogramowanie PowerFactory, nie jest dedykowane do rozwiązywania tego typu problemów. Sposób wykorzystania modelu sprzężeń magnetycznych dostępnego w programie PowerFactory do analizy rozptyłu prądów w przewodach odgromowych jest również pomysłem autora. Jest on mało wygodny i czasochłonny, zwłaszcza dla linii zawierających znaczną ilość przęseł, ale wyniki uzyskane w ten sposób pozwalają na ocenę dokładności metody autora.

Z porównania wyników uzyskanych trzema metodami wynika, że występuje bardzo duża zbieżność wyników uzyskiwanych autorską metodą tableau i oprogramowaniem PowerFactory. W prezentowanym w monografii przykładzie linii jednotorowej z pojedynczym przewodem odgromowym, o długości 12 km, analiza uzyskanych wyników wskazuje, że różnice pomiędzy wartościami prądów w przewodzie odgromowym obliczonymi tymi dwiema metodami nie przekraczają 1 A, co stanowi błąd względny mniejszy od 0,1%. Podobnie różnice wartości prądów w uziomach słupów, uzyskanych z wykorzystaniem proponowanej metody i programu PowerFactory nie przekraczają 0,5 A. Z kolei wartości prądów w przewodach odgromowych w części przęseł, jak i wartości prądów płynących w części uziomów słupów, uzyskane z modelu uproszczonego różnią się od wyników uzyskanych metodą tableau i za pomocą oprogramowania PowerFactory. Największe różnice w wartościach obliczonych prądów obserwować można w pobliżu początku i końca linii, przy stacjach elektroenergetycznych. Spowodowane jest to w dużej mierze odmiennym sposobem modelowania źródła prądu zwarciovego w modelu

¹ Autor nie dysponuje dostępem do programu MeLiNet, dlatego na potrzeby oceny dokładności obliczeń opracował własną implementację algorytmu obliczeniowego stosowanego w programie na postawie ogólnodostępnej dokumentacji programu.

uproszczonym. Różnice pomiędzy wynikami uzyskiwanymi w proponowanej metodzie a wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem algorytmu programu MeLiNet stają się bardziej widoczne, gdy rozważane są zwarcia w początkowej lub końcowej części linii - na słupach w pobliżu stacji elektroenergetycznych. Stosowanie metody opartej o uproszczony model linii elektroenergetycznej prowadzi wówczas do niedoszacowania wartości prądów w przewodach odgromowych w pobliżu stacji oraz przeszacowania wartości prądów płynących w uziomach słupów.

Zastosowanie metody uproszczonej dla linii jednotorowej z dwoma przewodami odgromowymi jest realizowane przez potraktowanie dwóch przewodów odgromowych jak przewodów wiązkowych. Podejście takie powoduje, że uzyskane w wyniku obliczeń wartości prądów w jednym (zastępczym wiązkowym) przewodzie odgromowym trzeba podzielić na dwa rzeczywiste przewody. Proste podzielenie wartości wyznaczonego prądu na dwa, prowadzić będzie do błędów związanych z niesymetrycznym oddziaływaniem pomiędzy przewodem fazy zwartej a położonymi w różnej odległości od przewodu fazowego, w którym wystąpiło zwarcie, przewodami odgromowym. Sytuacja będzie jeszcze trudniejsza do analizy, jeżeli na słupie stosowane będą dwa różne przewody odgromowe np. klasyczny przewód AFL i przewód OPGW zawierający włókna światłowodowe. Powyższe wskazuje na istotną przewagę proponowanej metody obliczeniowej nad metodą uproszczoną stosowaną obecnie.

Na podstawie przeprowadzonych analiz porównawczych można stwierdzić, że zaproponowana, autorska metoda cechuje się bardzo dużą dokładnością, przewyższając jednocześnie możliwości komercyjnego oprogramowania pod względem uniwersalności zastosowania.

W rozdziale czwartym przedstawiono propozycję modyfikacji metody obliczeniowej wprowadzając do równania (1) macierz admitancji \underline{Y} . Równanie przyjmie wówczas postać:

$$\underline{I}A_I + \underline{Y}E = 0 \quad (5)$$

Dzięki temu w prowadzonych proponowaną metodą tableau obliczeniach możliwe jest uwzględnienie wpływu parametrów poprzecznych linii (konduktancji i susceptancji) na wartości prądów płynących w przewodach odgromowych. Mimo że wpływ pojemności linii na wartości prądów zwarciovych jest niewielki, co zaprezentowano w monografii, to możliwość uwzględniania pojemności linii, może być przydatna przy wykorzystaniu metody tableau i modeli wielofazowych linii do innego rodzaju analiz, np. związanych ze zjawiskiem łuku wtórnego.

Rozdział piąty pracy poświęcono przedstawieniu metody doboru i weryfikacji doboru przewodów odgromowych dla linii elektroenergetycznych ze względu na wytrzymałość zwarciovą przewodów oraz na ocenę skuteczności ochrony przeciwporażeniowej linii pod kątem dopuszczalnego poziomu napięć uziomowych. W monografii wskazano, że dobierając przewody odgromowe pod względem wytrzymałości cieplej, należy określić najgorszą sytuację, powodującą przepływ największego prądu w danym odcinku przewodu odgromowego. Aby to obliczyć, należy przeanalizować (wykorzystując zaproponowane modele wielofazowe linii i metodę tableau) kolejno zwarcia występujące na poszczególnych słupach, poszukując wartości maksymalnego prądu dla danego odcinka przewodu odgromowego.

W rozdziale wskazano również na zalety stosowania przewodów odgromowych o zmniejszonej rezystancji. Wykazano, że powoduje to ograniczenie wartości napięć uziomowych przekładając się łatwiejsze spełnianie wymagań związanych z ochroną przeciwporażeniową linii.

W rozdziale szóstym pracy rozważano także wpływ zakłóceń w układzie odgromowym (przerwy w przewodach odgromowych, zmiany rezystancji uziomowej słupów linii) na dobór przewodów odgromowych ze względu na ich wytrzymałość zwarciovą oraz na ochronę przeciwporażeniową w linii.

Analizie poddano wpływ zmian rezystancji uziomowej części słupów w linii na maksymalne wartości prądów, jakie płynąć będą w przewodzie odgromowym w poszczególnych przęsłach linii oraz na wartości napięć uziomowych. Zwiększanie rezystancji uziemień spowodowało w analizowanym przykładzie niewielki, sięgający 10% wzrost wartości maksymalnych prądów obserwowanych w przewodzie odgromowym, przy czym największe zmiany obserwuje się w otoczeniu słupów, gdzie rezystancja uziomów ulega zmianie. Nie stanowi to istotnego zagrożenia dla przewodów odgromowych.

Jednak wzrost rezystancji uziemia części słupów powoduje duży, dochodzący, w prezentowanym w monografii przykładzie do 40%, wzrost napięć uziomowych. Może to powodować, że dla części słupów osiągane są wówczas wartości napięć zbliżonych do wartości granicznych dopuszczalnych w czwartej (najbardziej liberalnej) kategorii lokalizacji słupów². Może to powodować konieczność stosowania dodatkowych, zwykle kosztownych rozwiązań w celu zapewnienia wymaganego bezpieczeństwa przeciwporażeniowego.

Zmniejszenie rezystancji uziomów słupów w części linii skutkuje nieznacznym obniżeniem wartości prądów w przewodach odgromowych w otoczeniu tych słupów i powoduje obniżenie napięć uziomowych. Jest to sytuacja korzystna.

Dużo groźniejszą sytuacją, zwłaszcza dla linii wyposażonej w pojedynczy przewód odgromowy, jest przerwanie jego ciągłości. Wówczas wartości maksymalnego prądu obserwowanego w poszczególnych przęsłach linii zwiększają się istotnie. Największy wzrost wartości prądu występować będzie w pobliżu miejsca przerwania przewodu odgromowego. W prezentowanym w monografii przykładzie występowanie przerwy w przewodzie odgromowym w jednym przęśle powoduje prawie dwukrotny wzrost maksymalnej wartości prądu płynącego w przewodach odgromowych w przęsłach sąsiednich, względem prądu obserwowanego w układzie z zachowaną ciągłością przewodu odgromowego. Może to powodować istotne zagrożenie dla wytrzymałości cieplnej przewodów odgromowych, zwłaszcza gdy przerwa występować będzie w przęsłach ulokowanych w środkowej części linii, gdzie stosuje się często przewody o mniejszej wytrzymałości cieplnej. Przerwanie ciągłości przewodu odgromowego wpływa też niekorzystnie na wartości napięć uziomowych, powodując ich istotny wzrost w pobliżu miejsca, gdzie nastąpiło uszkodzenie.

W monografii dużą uwagę poświęcono także działaniu elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej linii: zabezpieczeniom nadprądowym ziemnozwarciowym (opartych o kryterium $3I_0$) oraz zabezpieczeniom impedancyjnym przy zakłóceniach w układzie odgromowym linii.

² Zgodnie z normą PN-EN 50341-1:2013-03 *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV - Część 1: Wymagania ogólne - Specyfikacje wspólne*

Stosując proponowaną, autorską metodę obliczania rozptywu prądów przeanalizowano wpływ zmian rezystancji uziemienia słupów linii oraz przerw w przewodach odgromowych na wartości prądów składowej zerowej, i tym samym na skuteczność działania zabezpieczeń nadprądowych ziemnozwarciowych. Wykazano, że jedynym zagrożeniem dla poprawności działania zabezpieczeń zerowoprądowych, związanych z układem ochrony odgromowej są przerwy w przewodzie odgromowym linii wyposażonych w pojedynczy przewód odgromowy. Mogą one, w zależności od lokalizacji miejsca zwarcia, spowodować częściowe skrócenie zasięgu działania pierwszego stopnia zabezpieczenia. Nie jest to sytuacja szczególnie groźna, bo i tak zabezpieczenie tego typu nigdy nie chroni całej linii, stanowiąc rezerwę dla zabezpieczeń podstawowych linii (impedancyjnych i/lub różnicowych), będąc jednocześnie rezerwowane przez drugi stopień zabezpieczenia nadprądowego obejmującego z zapasem całą linię.

Przeanalizowano również wpływ zmian rezystancji uziemienia słupów linii oraz przerw w przewodach odgromowych na działanie zabezpieczeń impedancyjnych (odległościowych) linii. Wskazano, że zmiana rezystancji uziemienia słupów może wpływać na wartość mierzonej przez zabezpieczenie rezystancji. Ze wzrostem rezystancji uziemienia słupów obserwuje się, zwłaszcza dla zwarć występujących w przęsłach znajdujących się w środkowej części linii, wzrost mierzonej przez zabezpieczenie rezystancji. Jednak, przy stosowanym powszechnie sposobie nastawiania zabezpieczeń impedancyjnych, uwzględniających szeroką tolerancję mierzonej rezystancji, nie będzie to miało negatywnego wpływu na poprawność działania zabezpieczeń. Przerwa w przewodzie odgromowym także wpływa na wartość mierzonej przez zabezpieczenie rezystancji, zwiększając jej wartość. Co gorsze, przerwa w przewodzie odgromowym powoduje też wzrost mierzonej przez zabezpieczenia impedancyjne reaktancji (ponieważ zmianie ulega współczynnik kompensacji prądowej linii), przez co skraca się zasięg działania zabezpieczenia. W konsekwencji, część zwarć, które powinny być wykryte w pierwszej strefie działania zabezpieczenia i wyłączone bezzwłocznie, przesuwa się do strefy drugiej, a czas wyłączenia linii wyłączenie ulega wydłużeniu. Powyższe zjawisko zostało potwierdzone badaniami laboratoryjnymi rzeczywistego zabezpieczenia impedancyjnego typu Siemens Siprotec 7SA6.

Najważniejszymi dokonaniem w przygotowanej monografii są w mojej ocenie:

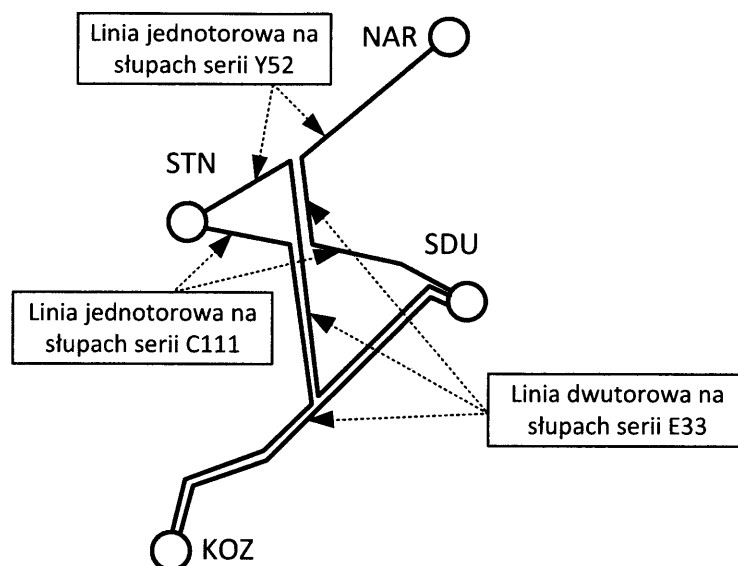
- wykorzystanie modeli wielofazowych linii elektroenergetycznych do obliczania rozptywu prądów w przewodach odgromowych,
- opracowanie nowej, uniwersalnej metody obliczania rozptywu prądów w przewodach odgromowych, opartej o wielofazowe modele linii elektroenergetycznych i metodę tableau,
- możliwość wykorzystania zaproponowanego algorytmu w praktycznie dowolnym środowisku programistycznym i możliwość jego komercjalizacji,
- możliwość analizy rozptywu prądów w przewodach odgromowych dla praktycznie dowolnego układu sieci, bez względu na jej rozmiar,
- praktyczna implementacja opracowanej metody obliczania rozptywu prądów w przewodach odgromowych w środowisku Freemat,
- kompleksowa analiza rozptywu prądów w przewodach odgromowych dla różnych konfiguracji linii elektroenergetycznych,

- weryfikacja opracowanej metody, potwierdzająca jej dużą dokładność,
- ocena wpływu zakłóceń (uszkodzeń) w systemie ochrony odgromowej na działanie układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

Po zakończeniu prac nad monografią, prezentowaną w monografii metodę obliczania prądów w przewodach odgromowych zastosowano w praktyce, realizując pracę badawczą na zlecenie PSE Inwestycje. Praca dotyczyła obliczeń prądów w przewodach odgromowych, w złożonym układzie sieci 400 kV zawierającym 4 stacje elektroenergetyczne: Kozienice, Siedlce Ujrzanów, Stanisławów i Narew. W układzie występowały zarówno linie jednotorowe jak i linie dwutorowe z przewodami odgromowymi typu AFL oraz OPGW. Uproszczony schemat analizowanego układu sieci przedstawiono na rysunku 5.

Łączna liczba przeseł linii w analizowanym układzie wynosiła prawie 900. Macierz opisująca układ (4), wykorzystywana w czasie obliczeń miała rozmiar rzędu 11000 x 11000. Do implementacji metody wykorzystano w tym przypadku pakiet Matlab. Łączny czas kompleksowej analizy (tj. poszukiwania maksymalnych prądów płynących w przewodach odgromowych w poszczególnych przesełach oraz maksymalnych prądów i napięć uziomowych wszystkich słupów) nie przekroczył czasu 10 minut.

Udana próba wykorzystania metody obliczeniowej w rzeczywistym systemie elektroenergetycznym o znacząco rozbudowanej strukturze potwierdza bardzo duże możliwości opracowanej metody. Na uwagę zasługuje fakt, że poza możliwością swobodnego modelowania bardzo złożonej struktury sieci czas wykonywania obliczeń był krótki. Mimo znacznego rozmiaru macierzy wykorzystywanej w opisie sieci nie napotkano problemów w czasie implementacji metody.



Rys. 5 Schemat rzeczywistego fragmentu sieci 400 kV będącego przedmiotem analizy z wykorzystaniem opracowanej metody

W najbliższym czasie zostaną podjęte działania, w celu komercjalizacji opracowanej metody. Zainteresowanie produktem wyraziły wiodące podmioty gospodarcze związane realizacją projektów modernizacji i rozbudowy krajowej sieci elektroenergetycznej.

Jednocześnie z pracą nad monografią powstał artykuł [15] zatytułowany „Earth wires currents calculation by tableau analysis”, mający przedstawić nową metodę obliczania prądów w przewodach odgromowych szerszemu gronu odbiorców na świecie. Artykuł jest w pełni mojego autorstwa. Praca została opublikowana w renomowanym czasopiśmie Electric Power Systems Research w roku 2017.

Praca zawiera syntetyczny przegląd istniejących metod obliczania prądów w przewodach odgromowych i wskazuje ich główne ograniczenia. Następnie prezentowane są wielofazowe modele linii elektroenergetycznych proponowane do wykorzystania w celu obliczania prądów w przewodach odgromowych oraz metoda obliczeniowa tableau. Artykuł zawiera kilka przykładów obliczeń rozptywu prądów w przewodach odgromowych i omówienie uzyskanych wyników. W pracy prezentowana jest też weryfikacja proponowanej metody obliczeniowej, polegająca na porównaniu uzyskanych wyników obliczeń do prac innych autorów.

Bibliografia związana z monografią habilitacyjną – pozycje wybrane

(drukiem pogrubionym wyróżniono publikacje, których kopię dołączono do Wniosku)

- [1] C. Desieno, P. Marchenko, and G. Vassell, "General Equations for Fault Currents in Transmission Line Ground Wires," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 8, pp. 1891–1900, Nov. 1970.
- [2] R. Verma and D. Mukhedkar, "Ground Fault Current Distribution in Sub-Station, Tower and Ground Wire," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 3, pp. 724–730, May 1979.
- [3] J. Endrenyi, "Analysis of Transmission Tower Potentials During Ground Faults," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, no. 10, pp. 1274–1283, Oct. 1967.
- [4] L. Levey, "Computation of fault currents and voltages along a multigrounded neutral power line having multiple phase conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1541–1548, 1991.
- [5] L. M. Popovic, "Practical method for evaluating ground fault current distribution in station, towers and ground wire," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 123–128, 1998.
- [6] L. M. Popovic, "A practical method for evaluation of ground fault current distribution on double circuit parallel lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 108–113, 2000.
- [7] F. Dawalibi, "Ground Fault Current Distribution Between Soil and Neutral Conductors," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 2, pp. 452–461, Mar. 1980.
- [8] H. Gooi and S. Sebo, "Distribution of Ground Fault Currents Along Transmission Lines -- An Improved Algorithm," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 3, pp. 663–670, Mar. 1985.
- [9] Z. Qi and Z. Rao, "Single-phase to ground fault current distribution in transmission system based on the improved double-side elimination method," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 417–424, 2016.
- [10] P. L. Buccheri and S. Mangione, "Analysis of ground fault current distribution along nonuniform multi-section lines," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 9, pp. 1610–1618, Sep. 2008.
- [11] Podręcznik użytkownika, *MeLiNet 2.0* -. Gliwice, 2016.
- [12] J. Klucznik, Z. Lubośny, and K. Dobrzyński, "Calculations of Short-Circuit Current Flows in Earth Wires of HV Lines," *Acta Energetica*, vol. 1, no. 26, pp. 45–50, Mar. 2016.
- [13] **J. Klucznik and S. Czapp, "Computer-aided calculations of earth potential rise in high voltage overhead lines," in *2015 International Conference on Information and Digital Technologies, 2015*, pp. 139–144.**
- [14] G. Hachtel, R. Brayton, and F. Gustavson, "The Sparse Tableau Approach to Network Analysis and Design," *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 101–113, 1971.
- [15] **J. Klucznik, Earth wires currents calculation by tableau analysis, *Electric Power Systems Research*, Volume 151, pp. 329-337, 2017**

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Tematem mojej rozprawy doktorskiej była optymalizacja lokalizacji i parametrów stabilizatorów systemowych. Tematyka poruszana w rozprawie koncentrowała się wokół zagadnień związanych z pracą systemu elektroenergetycznego: układami regulacji generatorów synchronicznych, stabilności lokalnej i stabilności globalnej systemu elektroenergetycznego oraz modelowania matematycznego elementów systemu elektroenergetycznego.

Prace badawcze i projekty realizowane po doktoracie znacząco rozszerzyły obszar moich zainteresowań naukowych. Obecnie moje prace badawcze koncentrują się na współczesnych problemach występujących w systemach elektroenergetycznych dotyczących obszarów sterowania, automatyki i stabilności. Realizowane prace badawcze opierają się o modelowanie matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego i analizy wykonywane z wykorzystaniem programów komputerowych. Do tego celu wykorzystuję zarówno dedykowane oprogramowanie komercyjne (Plans, PowerFactory, PSLF) oraz własne narzędzia obliczeniowe tworzone w środowisku Matlab, Freemat, Visual Basic itp.

Pełną listę opracowanych publikacji i zrealizowanych prac badawczych oraz mój szczegółowy wkład w realizację tych prac przedstawiłem w załączniku nr 4 *Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy z instytucjami naukowymi i o działalności popularyzującej naukę*, natomiast w niniejszym autoreferacie syntetycznie prezentuję problematykę jaką się zajmuję oraz moje najistotniejsze dokonania. W autoreferacie przedstawiono listę wybranych publikacji, które uznaję za najważniejsze.

Znaczna część zrealizowanych przeze mnie prac stanowi odpowiedź na bieżące problemy z jakimi borykają się podmioty gospodarcze związane z elektroenergetyką. Oznacza to, że tematyka moich prac jest aktualna, a wyniki zrealizowanych prac są wdrażane i stosowane w praktyce. Jednocześnie problemy pojawiające się w rzeczywistym systemie elektroenergetycznym stanowią dla mnie inspirację do przygotowywania kolejnych publikacji naukowych. Wśród zrealizowanych prac, których jestem autorem lub współautorem, można wyróżnić kilka najważniejszych obszarów badań.

Pierwszą grupę stanowią prace dotyczące stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego realizowane w latach 2007 – 2011, polegające na określeniu sposobów przeciwdziałania lawinie napięciowej. Podjęta tematyka stanowiła odpowiedź na awarię systemową, jaka miała miejsce w północno-wschodniej części Polski w roku 2006. W ramach zrealizowanych prac określono wpływ jednostek wytwórczych i ich układów regulacji na przebieg lawiny napięcia wskazując możliwe zagrożenia dla systemu elektroenergetycznego [1] - [3]. Mój udział w pracach polegał na przeprowadzeniu analiz i symulacji służących ocenie możliwości przeciwdziałania lawinie napięciowej poprzez częściowe ograniczenie generacji mocy czynnej bloku wytwórczego. Analizowałem również wpływ dodatkowych układów do kompensacji mocy biernej – niesterowalnych (baterie kondensatorów, dławiki) i sterowalnych (TCR, SVC, STATCOM) na pracę polskiego systemu elektroenergetycznego w stanach ustalonych i nieustalonych [4, 5]. Wykazałem, że modyfikując strukturę sterowania układu SVC można uzyskać efekt zwiększenia tłumienia kołysań elektromechanicznych w systemie elektroenergetycznym.

W tematyce dotyczącej procesów regulacji napięcia i gospodarki mocą bierną rozważałem możliwości wykorzystania farm wiatrowych w regulacji napięcia w sieciach dystrybucyjnych, wskazując, że istniejące techniczne możliwości wykorzystania tego potencjału blokowane są obowiązującymi przepisami i taryfami [6, 7]. Analizowałem również problemy, jakie mogą wystąpić w przypadku gdy farmy wiatrowe są przyłączane do sieci elektroenergetycznej kablami WN znacznej długości [8]. Dokładność kompensacji mocy biernej może wówczas istotnie zależeć od sposobu przyłączenia dławika kompensacyjnego. W pracy wykazano, że często stosowane rozwiązanie z dławikiem niesterowanym przyłączonym do szyn średniego napięcia może powodować niepełną kompensację mocy biernej, a w konsekwencji dodatkowe opłaty właściciela farmy na rzecz spółki dystrybucyjnej.

Następna grupa zrealizowanych prac dotyczy problemów regulacji częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. W tym przypadku prace były realizowane w latach 2006 - 2007 oraz w roku 2016. Prace dotyczyły z jednej strony zachowania się konwencjonalnych jednostek wytwórczych (bloków cieplnych) w warunkach naruszenia bilansu mocy czynnej w systemie elektroenergetycznym. Analizowano szczegółowo wpływ zmiany trybu pracy regulatora turbiny z regulacji mocy na regulację prędkości obrotowej przy znacznym odchyleniu częstotliwości od wartości znamionowej [9, 10]. Z drugiej strony analizowano wpływ źródeł odnawialnych – głównie farm wiatrowych na regulację częstotliwości w krajowym systemie elektroenergetycznym, rozważając między innymi możliwość wykorzystania farm wiatrowych w procesie regulacji pierwotnej. W ostatnich latach analizowano wpływ wypierania jednostek konwencjonalnych przez źródła odnawialne na inercję systemu elektroenergetycznego i szybkość zmian częstotliwości (wskaźnik ROCOF) w przypadku wystąpienia deficytu mocy czynnej. Opracowane w niniejszych pracach wnioski zostały wykorzystane przez operatora systemu przesyłowego w tworzeniu IRiESP (Instrukcja ruchu i eksploatacji systemu przesyłowego) oraz planów obrony i odbudowy krajowego systemu elektroenergetycznego.

Kolejna grupa zrealizowanych prac dotyczy układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. W pracach, których jestem autorem lub współautorem, podejmowana była z jednej strony problematyka modelowania zabezpieczeń dla celów analiz systemowych prowadzonych na złożonych modelach systemu elektroenergetycznego [12]. Z drugiej strony analizowane były, w oparciu o symulacje, badania laboratoryjne i zapisy z rejestratorów rzeczywistych zabezpieczeń, nieprawidłowości działania zabezpieczeń. W pracach wskazywałem między innymi na możliwe przypadki niepożądanego/nieprawidłowego działania zabezpieczeń odległościowych wyposażonych w blokady kołysaniowe czy zabezpieczeń od utraty wzbudzenia [13]-[15].

Nawiązano też współpracę z firmą zagraniczną Psymetrix Ltd. (Edynburg, Wielka Brytania), obecnie wchodzącej w skład koncernu GE, dla której zrealizowano dwa projekty. Pierwszy projekt dotyczył automatycznej estymacji parametrów generatora synchronicznego na podstawie przebiegów testowych zarejestrowanych na rzeczywistych obiektach [16]. Drugi projekt dotyczył zautomatyzowania procesu optymalizacji nastaw stabilizatorów systemowych dla hydrogeneratorów pracujących w systemie elektroenergetycznym Ekwadoru.

W latach 2007 – 2010 brałem udział w realizacji projektu Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju - Projekt Badawczy Zamawiany Nr PBZ-MEiN-1/2/2006. W ramach realizowanych przeze mnie prac powstały wybrane modele do badania bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego [17, 18]. Analizowałem także sposób działania układów regulacji turbin w procesie obrony i odbudowy systemu elektroenergetycznego. Zajmowałem się także problematyką ograniczeń dla możliwości pracy bloków cieplnych w sytuacji pracy z częstotliwością mniejszą od znamionowej i koordynacji tych ograniczeń z zabezpieczeniami podczęstotliwościowymi bloku oraz automatyką SCO [19, 20].

W ostatnich latach spektrum moich prac naukowych rozszerzyłem o problematykę związaną z pracą linii elektroenergetycznych najwyższych napięć. W ramach prac badawczych w tej dziedzinie od roku 2013 zajmowałem się modelowaniem łuku wtórnego, analizą zjawisk rezonansowych i przepięć, problematyką działania automatyki zabezpieczeniowej, kwestiami pomiarów mocy i energii. Wyniki moich prac w powyższym zakresie zostały wykorzystane w czasie projektowania, budowy i oddania do eksploatacji połączenia sieci elektroenergetycznych Polski i Litwy. Współpraca z operatorem systemu przesyłowego, PSE – Operator a także z wykonawcą stacji Ełk Bis, firmą Elfeko zaowocowały sukcesem w uruchomieniu połączenia w końcu 2015 roku. Do najistotniejszych elementów wykonanych badań i wypracowanych wniosków można zaliczyć:

- Wskazanie poważnych zagrożeń dla pracy linii Ełk Bis - Alytus w postaci zjawisk rezonansowych prowadzących do przepięć i bardzo dużych trudności z realizacją automatyki samoczynnego ponownego załączenia (SPZ). W ramach prowadzonych badań analizowano m. in. wpływ transpozycji w linii oraz układu przewodów fazowych linii dwutorowych na zjawiska rezonansowe [21], [22]. Wykazano, że pełna kompensacja mocy ładowania linii jest niepożądana i prowadzić może do trudności z prowadzeniem ruchu a nawet do poważnych awarii. W efekcie zmieniono pierwotny projekt układu kompensacji linii, zastępując dławiki w stacji Alytus jednostkami o większej mocy znamionowej.
- Opracowanie i implementację w programie PowerFactory modelu łuku wtórnego pozwalającego ocenić wymagany czas przerwy beznapięciowej przy realizacji jednofazowego cyklu SPZ. Dzięki opracowanemu modelowi łuku [23], [24] możliwe było określenie czasu przerwy beznapięciowej w zależności od sposobu uziemienia punktu neutralnego dławików kompensacyjnych. Określono również optymalne wartości reaktancji dławików uziemiających, pozwalających na ograniczenie prądu łuku wtórnego oraz ograniczenia szybkości wzrostu napięcia powrotnego po zgaszeniu łuku wtórnego. Uzyskane wyniki minimalnego czasu potrzebnego do zgaszenia łuku wtórnego wykorzystano w nastawieniach układów SPZ w liniach Ełk Bis – Alytus oraz Łomża – Ełk Bis.
- Opracowanie szczegółowego modelu dynamicznego modelu łącza HVDC typu back-to-back w stacji Alytus. Model ten został wykorzystany do analiz stabilności globalnej północno-wschodniej części Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.
- Opracowanie wytycznych dla zabezpieczenia dławików kompensacyjnych w stacji Ełk Bis [25]. Pracę można uznać za pionierską w skali kraju, bo jest to pierwsza w Polsce instalacja gdzie dławiki przyłączone są do linii elektroenergetycznych, a nie do szyn

stacji. Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano, że zabezpieczenia różnicowe są w stanie skutecznie zabezpieczyć dławiki od skutków zwarć wewnętrznych z wyłączeniem zwarć międzyzwojowych. Zabezpieczenie dławika od skutków zwarć międzyzwojowych jest trudne z wykorzystaniem standardowych zabezpieczeń wykorzystujących pomiary napięć i prądów, aczkolwiek w pewnym stopniu może być zrealizowane przez zabezpieczenia nadprądowe. Wykonane analizy wykorzystano w praktyce, dobierając nastawienia urządzeń zabezpieczających dławiki w stacji Ełk Bis.

- Identyfikację nietypowych układów pracy sieci mogących prowadzić do powstawania zjawisk rezonansowych i przebiegów. Wskazano, że pewne stany pracy sieci (układy topologii) na terenie północno-wschodniej Polski mogą powodować nasilenie zjawisk rezonansowych i w konsekwencji powodować przebiegi. Wykazano, że spowodowane jest to w szczególności strukturą filtrów RLC zainstalowanych w stacji przekształtnikowej HVDC. Zauważono, że stany sprzyjające zjawiskom rezonansowym mogą mieć miejsce zwłaszcza w przypadku znacznej asymetrii sieci spowodowanej niepełnofazowymi otwarciem wyłączników (jako skutek jednofazowych SPZ lub uszkodzeń wyłączników). Wskazano, że sytuacje takie są szczególnie groźne, gdy asymetria powstaje przy pracy systemów Polski i Litwy pojedynczym torem zasilającym (gdy w liniach dwutorowych tworzących połączenie wyłączony jest jeden z torów). W efekcie wykonanych prac zrezygnowano ze stosowania jednofazowego SPZ w takim przypadku na rzecz SPZ trójfazowego.
- Wyjaśnienie przebiegu i przyczyn dwóch awarii, jakie miały miejsce po oddaniu układu do eksploatacji [26], [27]. Wykazano, wykorzystując modele matematyczne linii elektroenergetycznych oraz w oparciu o zapisy z rejestratorów zakłóceń, że sprzężenia magnetyczne i pojemnościowe w liniach dwutorowych mogą powodować, że napięcia w torze wyłączonym (a nie uziemionym) mogą na skutek zjawisk rezonansowych osiągać znaczne wartości, prowadzące do uszkodzenia aparatury. Wyjaśniono również, mechanizm wzrostu prądu w dławikach kompensacyjnych przyłączanych do linii bezpośrednio po jej wyłączeniu. Zjawisko takie wystąpiło w stacji Ełk Bis i było przyczyną pobudzenia i zadziałania zabezpieczeń dławika.
- Wyjaśnienie obserwowanych anomalii w pomiarach mocy i energii na linii Ełk Bis – Alytus [28]. Wykazano analitycznie, potwierdzając obserwacje z liczników energii, że w linii dwutorowej przy pracy równoległej obu torów, wartości mocy płynących w obu torach mogą się istotnie różnić, a straty mocy czynnej w jednym torze linii, określone jako różnica mocy dopływającej do danego toru i mocy odpływającej, mogą być ujemne. Efekt występowania „ujemnych” strat mocy w przypadku różnych torów linii wielotorowych (w rozważanym przypadku linii dwutorowej) jest związany z niesymetrią napowietrznych linii przesyłowych. Niesymetria układu prowadzi do przesyłu części energii z jednego toru do drugiego jako wynik występowania sprzężeń elektromagnetycznych i pojemnościowych.
- Wyniki badań i wnioski były prezentowane przeze mnie na spotkaniach roboczych operatorów systemu przesyłowego Polski i Litwy w Warszawie i Wilnie.

Jednocześnie z pracami dotyczącymi obliczania prądów zwarciovych w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych oraz problematyki związanej z pracą sieci przesyłowej w północno – wschodniej części KSE od stycznia 2015 do chwili obecnej jestem zaangażowany w europejski projekt UPGRID (www.upgrid.eu), realizowany w ramach programu Horyzont 2020. Projekt, którego pełna nazwa brzmi „Real proven solutions to enable active demand and distributed generation flexible integration, through a fully controllable low voltage and medium voltage distribution grid” realizowany jest równolegle w siedmiu różnych państwach europejskich. Ze strony polskiej w projekcie bierze udział ENERGA-OPERATOR SA, Politechnika Gdańska, Instytut Elektroenergetyki oraz Atende SA. W swoim założeniu grant ten dotyczy oceny możliwości realizacji systemu zdalnego monitorowania i sterowania siecią niskiego i średniego napięcia w oparciu o pomiary z liczników konsumentów oraz systemu zbierania i przetwarzania danych AMI. Projekt jest realizowany na istniejącej sieci SN i nn jednej z dzielnic Gdyni – Witomina, obejmującej około 15 tys. odbiorców. Mój udział w projekcie polega na przygotowaniu, a następnie na ocenie poprawności implementacji i ocenie funkcjonowania algorytmów obliczeniowych wykorzystywanych w powstającym systemie monitorowania i zarządzania pracą sieci niskiego napięcia. W ramach zrealizowanych prac, których jestem autorem lub współautorem zostały przygotowane (i obecnie częściowo zaimplementowane w systemie DMS - Distribution Management System) następujące moduły obliczeniowe: obliczanie rozptywu mocy i poziomów napięć w sieci nn, estymacja stanu sieci nn, prognozowanie obciążenia i generacji w sieci nn, optymalizacja punktów podziału sieci nn, prognozowanie temperatury transformatorów SN/nn [29].

Wykaz wybranych publikacji

(drukem pogrubionym wyróżniono najważniejsze publikacje, których kopię dołączono do Wniosku)

- [1] Klucznik J., Małkowski R., Szczeciński P., Zajczyk R.: Wpływ ograniczników: kąta mocy, prądu stojana i wzbudzenia na rozwój awarii napięciowej, Energetyka, Zesz. tem. nr XVII, 2008, s. 112-122
- [2] Klucznik J., Zajczyk R., Małkowski R., Szczeciński P.: Wpływ obecnie stosowanych układów regulacji generatorów na możliwości pogłębienia awarii napięciowej, Archiwum Energetyki, tom 39, nr 1, 2009, s. 87-97
- [3] Klucznik J., Małkowski R., Zajczyk R., Szczeciński P.: Praca regulatora generatora w warunkach sprzyjających powstawaniu lawiny napięcia - wybrane problemy, Acta Energetica, 1/1, 2009, s. 50-60
- [4] Klucznik J.: Możliwości tłumienia kołysań wirników generatorów przez kompensatory statyczne typu SVC, Energetyka, zesz. tem. XXIII, 2012, s.12-17
- [5] Kowalak R., Małkowski R., Czapp S., Klucznik J., Lubośny Z., Dobrzyński K.: Computer-aided analysis of resonance risk in power system with Static Var Compensators, Przegląd Elektrotechniczny, nr. 3, 2016, s.20-25
- [6] Klucznik J.: Układ sterowania farmy wiatrowej realizujący regulację napięcia i mocy biernej, Archiwum Energetyki, tom 37., nr spec., 2007, s. 251-260
- [7] Klucznik J.: Udział farm wiatrowych w regulacji napięcia w sieci dystrybucyjnej, Acta Energetica, 1/3, 2010, s. 38-46
- [8] Klucznik J.: Problems of Connecting Wind Farms to the Power System with HV Cables, Acta Energetica, 2/27, 2016, s.118-122

- [9] Dobrzyński K., Klucznik J., Lubośny Z.: Układy regulacji turbin parowych w procesie odbudowy systemu elektroenergetycznego, *Energetyka*, zeszyt tematyczny nr XX, 2010, s.32-35
- [10] Klucznik J., Lubośny Z., Dobrzyński K.: Propozycja modyfikacji struktury regulatorów turbin parowych, *Energetyka*, zesz. tem. XXIII, 2012, s. 17-23
- [11] Klucznik J., Lubośny Z.: Możliwości wykorzystania farm wiatrowych do regulacji częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, *Archiwum Energetyki*. tom 39, nr 1, 2009, s.273-284
- [12] Klucznik J., Lubośny Z.: Modelowanie układów automatyki zabezpieczeniowej w systemach elektroenergetycznych, XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE'07, Jurata, 2007.
- [13] Klucznik J., Lubośny Z.: Weryfikacja nastawień zabezpieczeń od utraty wzbudzenia na przykładzie elektrociepłowni przemysłowej, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 3, 2012, s. 32-35
- [14] Łosiński M., Klucznik J.: Performance analysis of power swing blocking feature in ABB 670 series impedance relays, *Acta Energetica*, 4/13, 2012, s. 75-86
- [15] Klucznik J., Lubośny Z., Dobrzyński K.: Zabezpieczenia impedancyjne bloków energetycznych przy zwarcjach bliskich, XIV ogólnopolska konferencja „Zabezpieczenia Przekaznikowe w Energetyce”, Warszawa-Józefów, 2011
- [16] Lubośny Z., Klucznik J., Dobrzyński K.: Estimation of Selected Synchronous Generator Parameters Based on the Gradient Method, *Acta Energetica*, 1/18, 2014, s. 102-108
- [17] Dobrzyński K., Klucznik J., Kowalak R., Lubośny Z., Łosiński M., Szczeciński P., Zajczyk R.: Modele matematyczne do badania bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego - Tom 2, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012
- [18] Klucznik J., Małkowski R., Lubośny Z., Łosiński M., Zajczyk R.: Modele matematyczne do badania bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego - Tom 3, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012
- [19] Dobrzyński K., Klucznik J., Lubośny Z., Szczeciński P., Szczerba Z., Zajczyk R.: Automatyka systemowa a bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju - Tom 1: Węzły wytwórcze, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013
- [20] Dobrzyński K., Klucznik J., Małkowski R., Szczerba Z.: Automatyka systemowa a bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju - Tom 2: Zabezpieczenia, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013
- [21] **Lubośny Z., Klucznik J., Dobrzyński K.: The Issues of Reactive Power Compensation in High-voltage Transmission Lines, *Acta Energetica*, 2/23, 2015, s. 102-108**
- [22] **Klucznik J., Lubośny Z., Dobrzyński K., Czapp S.: EHV transmission lines wires location on line operation issues - case studies, 2015 IEEE PowerTech, Eindhoven 2015.**
- [23] **Klucznik, J., Lubosny, Z., Dobrzynski, K., Czapp, S.: Nonlinear secondary arc model use for evaluation of single pole auto-reclosing effectiveness, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering Volume: 34 Issue:, s. 647-656, 2015,**
- [24] **Klucznik, J., Lubośny, Z., Dobrzyński, K., Czapp, S., Secondary arc modelling for single pole reclosing analyses, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Denver, USA, 2015.**
- [25] **Lubośny Z., Klucznik J., Dobrzyński K.: Problems of Selecting Protection for Shunt Reactors Working in Extra-High Voltage Grids, *Acta Energetica*, 2/27, 2016, s.139-143**

- [26] Klucznik J., Lubośny Z., Dobrzyński K., Czapp S., Resonance Problems in UHV Transmission Lines, IEEE 17th International Conference on Environmental and Electrical Engineering (EEEIC), Mediolan, Włochy, 2017.
- [27] Klucznik J., Lubośny Z., Dobrzyński K.: Zjawiska rezonansowe a praca zabezpieczeń nadprądowych dławików kompensacyjnych linii wysokiego napięcia, Wiadomości Elektrotechniczne 04/2017, s. 12-15
- [28] Klucznik J., Lubosny Z., Dobrzynski K., Czapp S., Kowalak R., Trebski R., Pokora S.: Magnetic and capacitive couplings influence on power losses in double circuit high voltage overhead transmission line, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Volume: 36 Issue: 3, 2017,
- [29] Dobrzyński K., Lubośny Z., Klucznik J., Noske S., Falkowski D.: Wykorzystanie struktury AMI w monitorowaniu i sterowaniu sieciami niskiego napięcia, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 53, 2017, s.133-136

6. Omówienie osiągnięć dydaktycznych i organizacyjnych.

W latach 2004 – 2017 moja działalność dydaktyczna obejmowała następujące przedmioty prowadzone na specjalności elektrotechnika oraz energetyka, na studiach pierwszego i drugiego stopnia:

- Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa – wykład, ćwiczenia, laboratorium
- Modelowanie procesów w elektroenergetyce – wykład, laboratorium
- Przesyłanie energii elektrycznej – wykład
- Podstawy elektroenergetyki – ćwiczenia
- Systemy elektroenergetyczne – laboratorium
- Urządzenia i instalacje elektryczne – wykład, laboratorium

W latach 2004 – 2017 pełniłem funkcje opiekuna prac dyplomowych:

- łączna liczba zrealizowanych prac magisterskich 43

- łączna liczba zrealizowanych prac inżynierskich 49

Obecnie pełnię funkcję promotora pomocniczego w dwóch przewodach doktorskich

W ramach działalności organizacyjnej związanej z pracą na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG jestem opiekunem laboratorium Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieceniowej. Ponadto zajmowałem stanowiska związane z rekrutacją kandydatów (sekretarz komisji rekrutacyjnej w latach 2004 i 2005) i związane z oceną pracy nauczycieli akademickich (członek komisji). Pełniłem też funkcję opiekuna roku dla kierunku Energetyka.