

Marcin Maciej Mackiewicz

Autoreferat pracy doktorskiej

**ANALIZA ROZPŁYWÓW PRZEPIĘĆ W SIECIACH
ELEKTROENERGETYCZNYCH W ASPEKTCIE WYTRZYMAŁOŚCI UKŁADÓW
IZOLACYJNYCH PRZY NIESTANDARDOWYCH NARAŻENIACH
PRZEPIĘCIOWYCH**

Promotor:

dr hab. inż. January Lech Mikulski Prof. nadzw.

Recenzenci:

dr hab. inż. Krzysztof Siodła, prof. PP.

Politechnika Poznańska

Wydział Elektryczny

dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz

Politechnika Rzeszowska

Prorektor ds. kształcenia

Warszawa 2018

Spis treści

1. Uzasadnienie wyboru tematu pracy	3
2. Cel pracy i tezy badawcze	4
3. Struktura pracy	6
4. Źródła i metody badawcze.....	7
5. Charakterystyka i wyniki przeprowadzonych badań.....	8
6. Znaczenie praktyczne i teoretyczne pracy doktorskiej	9

1. Uzasadnienie wyboru tematu pracy

Badania nad wytrzymałością izolacji linii i stacji w technice wysokich napięć stanowią bardzo istotną jej część. Najczęściej wymienianymi powodami podejmowania kolejnych prób badań poszczególnych obiektów stacyjno – liniowych jest brak jasno zdefiniowanej odpowiedzi jaki jest rzeczywisty kształt czasowo – napięciowy narażenia piorunowego. W celu ujednoczenia wyników badań tych samych obiektów w różnych laboratoriach udar znormalizowano do kształtu $T_1 = 1,2 \mu s$ czasu trwania czoła i $T_2 = 50 \mu s$ czasu trwania do półszczytu udaru. Tak określony udar zawarty jest w metodzie deterministycznej koordynacji izolacji, która przedstawia różnice między napięciami obniżonymi na ogranicznikach stosowanych w ochronie, a napięciami wytrzymywanymi przy udarach znormalizowanych 1,2/50 μs . W uproszczonym pojęciu koordynacji izolacji, nie uwzględnia ona możliwości wystąpienia innego udaru niż standardowy 1,2/50 μs . Przyjęty jednak margines koordynacyjny, którego rząd szacuje się na 30% może, jak wykazuje analiza literaturowa, być niewystarczający, w przypadku wystąpienia wielu niekorzystnych zjawisk obniżenia wytrzymałości izolacji w tym samym momencie. Najistotniejsze z nich to :

- obniżenie wytrzymałości izolacji na skutek wydłużenia czasu trwania czoła udaru T_1 ,
- zwiększenie przepięcia poprzez przepływ prądu pioruna na połączeniach stacyjnych i linii.

Poznanie zjawisk odpowiedzialnych za istotę wytrzymałości elektrycznej jest konieczne, jeżeli dokonywana analiza koordynacji izolacji wysokich napięć ma być właściwa. W szczególności pojęcie to, nabiera znaczenia w dobie optymalizacji kosztów projektowania stacji i linii. W związku z lepszym poznaniem zjawisk, obniżania poziomów izolacji, istnieje uzasadniona potrzeba pogłębienia badań nad wytrzymałością izolacji przy niestandardowych udarach probierczych, zbliżonych do rzeczywistych narażeń piorunowych, ze szczególnym uwzględnieniem nowoczesnej techniki probierczo – pomiarowej oraz aktualnie stosowanych metod statystycznych mających na celu właściwe określenie wiarygodności wyników badań.

Potwierdzeniem trafności wyboru tematu i celu pracy przyjętych przez Autora założeń jest możliwość przeprowadzenia unikatowych na skalę światową badań w laboratorium Wysokich Napięć w Instytucie Energetyki oraz przeprowadzenia symulacji komputerowych w wyspecjalizowanym programie EMTP – RV.

2. Cel pracy i tezy badawcze

Technika wysokich napięć zawiera w swoich podstawowych założeniach wytwarzanie i pomiar udarów laboratoryjnych. W dziedzinie tej brak jest jednak informacji o bezpośrednich pomiarach napięć rzeczywistego wyładowania piorunowego. Wykonanie takiego pomiaru jest technicznie bardzo trudne, ponieważ nie można praktycznie określić, jakiej wartości napięcia możemy się spodziewać.

Temat większości publikacji dotyczących szacowania parametrów napięciowych rzeczywistego pioruna, sprowadza się do metod:

- symulacji napięcia indukowanego w linii w sytuacji uderzenia pioruna w pobliże stacji,
- pomiarów fal przepięciowych w stacjach w przypadku uderzenia pioruna w przewód odgromowy linii wchodzącej do stacji oraz rzadkiego uderzenia pioruna w przewód roboczy linii.

Tylko nieliczne prace publikowane w latach 1950 – 2010 przedstawiają w sposób istotny pomiary napięć indukowanych w liniach.

Pewnego rodzaju alternatywą badań zjawisk przepięciowych, w szczególności obserwacji rozptyłów prądów i napięć w stacji, są szeroko pojęte metody numeryczne. Są to prace zmierzające do stworzenia uniwersalnego modelu symulacyjnego, pozwalającego na szczegółową obserwację fal przepięciowych i ich późniejszą analizę. Niniejsza praca poświęcona jest problematyce wytrzymałości izolacji przy zastosowaniu niestandardowych udarów probierczych, zbliżonych do rzeczywistych narażeń piorunowych.

Wstępne studia literaturowe, przemyślenia Autora rozprawy stały się podstawą do sformułowania następujących celów badawczych:

- W literaturze nie ujęto jednoznacznie prowadzonych badań nad rzeczywistą izolacją wysokonapięciową aparatów elektrycznych przy niestandardowych narażeniach piorunowych w szczególności czasów trwania czoła innych niż standardowy $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$. W rezultacie Autor rozprawy proponuje rozszerzenie wiedzy o informację dotyczącą badań układów izolacyjnych wraz z osprzętem ochronnym oraz aparatach elektrycznych montowanych bezpośrednio na stacjach wysokich napięć.

- Przedstawiony przegląd literatury pozwala na sformułowanie procesu badań nad rzeczywistymi układami izolacji mając na celu potwierdzenie występującego obniżenia wytrzymałości, od lat 50-tych, które obserwowano jedynie na obiektach modelowych, które nie wykazują tych samych właściwości co rzeczywiste obiekty izolacyjne wraz z pełnym osprzętem łuko - ochronnym.
- Aktualnie stosowany zapas koordynacyjny, który zdecydowanie był określany w czasach, kiedy nie było możliwości przeprowadzania analiz komputerowych szczególnie tak zaawansowanych jak programem EMTP – RV. Zawiera wprawdzie na tyle dużo zapasu bezpieczeństwa, w którym powinny mieść się wszystkie zjawiska nieskorzystanie wpływające na obniżenie wytrzymałości izolacji. Jednak jak wykazuje analiza literaturowa oraz wyki badań rzeczywistych obiektów jak i wyniki symulacji komputerowych, wskazują na możliwość występowania sytuacji niedoszacowania aktualnie stosowanego zapasu koordynacyjnego. Autor rozprawy proponuje rozszerzyć wiedzę z tego zakresu.

Przytoczone fakty pozwalają na sformułowanie głównej tezy pracy:

Właściwa ocena współczesnych rozwiązań ochrony odgromowej stacji 110 – 400 kV wymaga uwzględnienia przebiegów czasowych rzeczywistych narażeń piorunowych występujących w tych stacjach oraz zmian wytrzymałości układów izolacyjnych stosowanych w nich urządzeń, poddanych niestandardowym udom napięciowym.

3. Struktura pracy

Do realizacji wyznaczonych celów i potwierdzenia tezy, przyjęto podział pracy na poszczególne rozdziały.

W pierwszej części (rozdział 2 i 3) szczególną uwagę poświęcono na przegląd literatury z zakresu parametrów prądu i napięcia pioruna rzeczywistego. Dane te mają decydujące znaczenie dla przeprowadzanych obliczeń i symulacji komputerowych. Omówiono metody obserwacji przepięć indukowanych w stacji i linii. Przedstawiono również przykładowe charakterystyki pomiarowe ze szczególnym uwzględnieniem czasu trwania czoła udaru napięciowego.

W kolejnych częściach pracy (rozdział 5 i 6) omówiono stosowany układ probierczo – pomiarowy, którym dokonywano badań. Wyniki przeprowadzanych prób podlegały również analizie statystycznej mającej na celu właściwie określenie niepewności pomiarowej. Przedstawiono, także obiekty badań linii i stacji 110 – 500 kV takie jak:

- odłączniki stacyjne 110 – 500 kV,
- łańcuchy izolatorów w układach odciągowych oraz przelotowych, jedno rzędowych jak i dwurzędowych dla napięć od 110 – 400 kV, aktualnie stosowanych w energetyce polskiej oraz zagranicznej,
- izolatory wsporcze na napięcia zróżnicowane 220 kV i wyższe.

Badane układy łańcuchów izolatorów składały się z izolatorów porcelanowych, kompozytowych jak i kołpakowych szklanych z pełnym osprzętem łuko-ochronnym.

Siódma część (rozdział 7) przedstawia wyniki badań układów izolacyjnych linii i stacji 110 – 400 kV przy zastosowaniu niestandardowych udarów piorunowych innych niż 1,2/50 μ s. Przedstawiono również wnioski dotyczące analizy wytrzymałości izolacji w aspekcie uzyskanych wyników badań oraz obserwacji symulacyjnych w programie EMTP – RV.

Dziewiąta część pracy (rozdział 9) poświęcona jest metodom numerycznym. Do symulacji wykorzystano program EMTP – RV, który swoim interfejsem umożliwia dowolną konfigurację metod badawczych. Pozwala, również na tworzenie modeli stacji wysokich napięć z zaimplementowanymi pod-modelami dostępnymi w programie. W przedstawianej pracy zaprojektowano fragment stacji 400 kV. Sporą część poświęcono na omówienie poszczególnych modeli np. słupa, połączeń stacji czy modelu przeskoaku odwrotnego.

4. Źródła i metody badawcze

Przeprowadzone badania są oparte na krajowych i zagranicznych źródłach literaturowych z zakresu badań nad zjawiskami przepięciowymi oraz poszczególnymi badaniami przeprowadzonymi na poszczególnych układach modelowych (110 pozycji literaturowych).

W opisie metod badawczych zjawisk wysoko-napięciowych, w szczególności do określenia wartości napięcia wytrzymywanego, stosuje się metodę Dixona i Mooda. Metoda ta opiera się bezpośrednio na analizie rozkładu napięć wytrzymywanych badanego obiektu. Charakterystykę tą tworzy się na podstawie obserwacji obiektu w trakcie badań. Do badanego obiektu przykładają się napięcia, które orientacyjnie odpowiada jego wytrzymałości. W przypadku, gdy wystąpi przeskok „X” napięcie obniża się o nie więcej niż 2% wartości średniej wytrzymywanej. Obniżenia dokonuje się do momentu, gdy nie wystąpi przeskok „O”. Od tego momentu zaczyna się proces podnoszenia napięcia. Każdorazowa próba jest rejestrowana, a efektem jest powstanie charakterystyki napięć wytrzymywanych.

Do przeprowadzenia badań było konieczne użycie generatora udarów piorunowych, którego konstrukcja oraz inne parametry techniczne pozwoliłyby na kontrolowaną zmianę kształtu czasu trwania czoła generowanego udaru T_1 . Badania nad wytrzymałością izolacji linii i stacji 110 – 400 kV przeprowadzono w Laboratorium Wysokich Napięci Instytutu Energetyki, w którym używa się generatora udarowego 5MV o mocy 375 kJ współpracującym z dzielnikiem firmy Haefely 4,5 MV.

W niniejszej pracy wykorzystano również badania symulacyjnie, do których używano programu EMTP – RV z rodziny programów POWERSYS. Program posiada wbudowany interfejs EMTP – Works, który w prosty sposób umożliwia łączenie poszczególnych elementów dostępnych w programie. Baza dostępnych podstawowych modeli, takich jak kondensatory, rezystancje oraz indukcyjności, pozwala na budowanie nowych własnych modeli. W celu obserwacji przebiegów napięć oraz prądów służy moduł „View Sopes”.

Istotny wpływ na właściwą ocenę koordynacji izolacji jest dokładne zbadanie i zrozumienie sposobu zabezpieczania stacji przed przepięciami. Aktualne rozmieszczanie ograniczników przepięć na wejściu stacji jak i przy transformatorach, może okazać się niewystarczające lub nieodpowiednio zaprojektowane. Tematem wielu publikacji są analizy przebiegów przepięć w liniach oraz stacjach. Wielu też Autorów publikacji, prowadziło wieloletnie badania mające na celu potwierdzenie jakości wyników uzyskiwanych na drodze

symulacji programem EMTP – RV. Badania te potwierdzają zgodność wyników uzyskiwanych metodą symulacji oraz w badaniach rzeczywistych obiektów.

Dokonana na podstawie literatury przedmiotu i badań empirycznych analiza problemu badawczego umożliwiła realizację celu pracy i sformułowanie wniosków w zakresie podjętej tematyki.

5. Charakterystyka i wyniki przeprowadzonych badań

Dla realizacji wyznaczonego celu głównego prowadzone przez Autora badania koncentrowały się głównie na analizie i ocenie wyników badań eksperymentalnych, uzyskanych w laboratorium wysokich napięć oraz na wynikach otrzymanych na zamodelowanych układach R,L,C. Szczególną uwagę podczas badań laboratoryjnych Autor rozprawy zwracał na obiekt badań, który w istocie rzeczy miał być w takim samym układzie w jakim będzie montowany bezpośrednio na liniach lub stacjach. Fakt ten implikował konieczność stosowania pełnego osprzętu łuko-ochronnego oraz zimitowania odpowiedniej podstawy, na której np.: odłącznik lub też układ łańcucha izolatorów będzie zamontowany w rzeczywistości.

Przeprowadzone badania eksperymentalne, przedstawione w dezyderacie, dowodzą znacznego obniżenia wytrzymałości izolacji linii i stacji 110 – 400 kV. Badania te stanowią uzupełnienie wiedzy literaturowej oraz dokumentują, iż znaczne obniżenia rzeczywistej izolacji urządzeń stacyjnych oraz układów izolacyjnych linii mogą stanowić znaczne zagrożenie w sytuacjach:

- wyładowania piorunowego w słup wysokiego napięcia oraz wystąpienia przeskoaku odwrotnego,
- wyładowania piorunowego w przewody robocze linii wysokiego napięcia,
- wyładowania piorunowego bezpośrednio w urządzenia stacji 110 – 400 kV.

W omawianych sytuacjach występujące narażenia przepięciowe, maksymalnych wartości napięć, charakteryzują się znacznie zróżnicowanymi wartościami czasów czoła T_1 , które mieszczą się w granicach od 2 μ s do 12 μ s. Efektem tego zjawiska jest znaczne, bo sięgające nawet 26%, obniżenie znamionowej wytrzymałości izolacji. Obecnie stosowana koordynacja, definiująca różnicę napięć między napięciem na ograniczniku a rzeczywistą wartością wytrzymywaną, izolacji jest niewystarczająca, ponieważ standardowe badania układów lub urządzeń wysokonapięciowych dokonuje się przy udarze znormalizowanym, którego czas czoła

wynosi $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$. Schematyczne różnice wartości wytrzymywanych dla poszczególnych grup napięciowych zawarte zostały w pracy.

6. Znaczenie praktyczne i teoretyczne pracy doktorskiej

W prezentowanej pracy była prowadzona ocena rzeczywistej wytrzymałości układów izolacyjnych linii i stacji 110 – 400 kV, poprzez badania laboratoryjne odłączników, wyłączników, oraz układów izolacyjnych linii wysokich napięć od 110 kV do 500 kV. Badania przeprowadzono na urządzeniach, które znajdują wykorzystanie w polskiej oraz europejskiej energetyce stosowanej. Szczegółowe dane obiektów zawarte są w rozdziale 7 niniejszej pracy.

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych w programie EMTP – RV umożliwiają natomiast rozszerzenie uzyskanych wyników badań urządzeń, na układy stacyjne, które z powodu rozległości, trudno byłoby zbadać w laboratorium.

Analizując ocenę aktualnie stosowanej ochrony odgromowej poprzez dane literaturowe oraz poprzez dane techniczne istniejących stacji oraz linii wysokich napięć, Autor wyraża przypuszczenie o możliwym zagrożeniu wytrzymałości izolacji. Wniosek ten ma poparcie w fakcie, że na wytrzymałość układów izolacyjnych składa się wiele czynników. Są to: obniżenie wytrzymałości przy zastosowaniu przepięcia, którego czas trwania czoła T_1 różni się od znormalizowanego $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$, co powoduje obniżenie wytrzymałości badanej izolacji, oraz wzrost narażenia wynikający z indukcyjności połączeń, które w swojej istocie powodują powstanie oscylacji na czole udaru. Zjawisko to jest dodatkowym zwiększeniem narażenia o wartości napięć mogące w sposób znaczący decydować o wytrzymałości izolacji. Dlatego też Autor uważa za bardzo istotne, w przypadku obserwacji kształtu przepięcia wchodzącego do stacji lub też wędrującego po stacji, odpowiednie zaimplementowanie poszczególnych elementów stacji, ponieważ pomiędzy nimi, jak wykazuje literatura techniczna, występuje znaczna odległość. Obserwowane zagrożenie ma szczególną wagę w rozległych stacjach o napięciu 400 kV, z szynami obejściowymi, których odległości mogą dochodzić nawet do 200 m i więcej. Ma to istotne znaczenie w przypadku obserwacji wytrzymałości z punktu widzenia przepięcia. Literatura krajowa i światowa podaje, że średnio na 1 metrze przewodu, pomijając ulot, istnieje indukcja około $1 \mu\text{H}$.

Spadek napięcia na indukcyjności w krytycznej sytuacji, gdy odległość między wejściem przepięcia do stacji a zagrożonym obiektem, np.: odłącznikiem, wynosi około 150 m, to wzrost przepięcia wynikający z przepływu prądu pioruna może osiągnąć wartość nawet do 100 kV

i więcej. Jeżeli tę wartość uwzględnimy w analizie obniżonej wytrzymałości izolacji, wynikającej z niestandardowych narażeń piorunowych, innych niż 1,2/50 μ s, może nastąpić przeskok na izolacji, co może skutkować bardzo niebezpiecznymi konsekwencjami. Autor wyraża przekonanie, że wytrzymałość izolacji linii oraz stacji 110 – 400 kV można analizować z punktu widzenia wielu zagrożeń jednocześnie.

Jak wykazują badania laboratoryjne nad rzeczywistymi układami izolacyjnymi, wytrzymałość izolacji może ulec zmniejszeniu nawet do 20 % znamionowej wartości wytrzymawanej, przy założeniu, że udar znacznie różni się od znormalizowanego.

W europejskiej normie PN – EN 60060 – 1 : styczeń 2011, „Wysokonapięciowa technika probiercza – Część 1. Ogólne definicje i wymagania probiercze”, przedstawiono podstawowe parametry narażenia napięciowego, któremu powinno się poddawać badane obiekty. Jest to udar piorunowy o kształcie czasu trwania czoła $T_1 = 1,2 \mu$ s oraz czasie trwania do półszczytu $T_2 = 50 \mu$ s. Przedstawiony kształt napięciowy został ustanowiony w celu ujednoczenia wyników badań w laboratoriach oraz w celu umożliwienia porównania wyników między różnymi laboratoriami. Przyjęta tolerancja 30% czasu trwania czoła T_1 , nie ujmuje właściwego odzwierciedlenia rzeczywistego udaru piorunowego, który jak wskazuje analiza literatury oraz wyniki badań symulacyjnych znacznie różni się od opisywanego w normie.

Dokładna analiza pomiarowa obserwowanej wytrzymałości z jednoczesną pogłębioną analizą niepewności pomiarów, wraz z obszernymi symulacjami komputerowymi programem EMTP – RV, pozwala na właściwą ocenę zagrożeń płynących z rzeczywistego narażenia piorunowego. Celem pracy również jest poszerzenie wiedzy z zakresu aktualnie stosowanej, ochrony odgromowej stacji, poprzez ewentualne zastosowanie dodatkowych ograniczników w miejscach szczególnie narażonych na obniżenie wytrzymałości.

Analiza literatury przedmiotu oraz przeprowadzone badania eksperymentalne wraz z przeprowadzonymi symulacjami komputerowymi w programie EMTP – RV potwierdziły zasadność postawionych we wstępie pracy tezy badawczej.

Z wyrazami szacunku
Marcin Mackiewicz