

Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Katedra Inżynierii Elektrycznej

dr hab. inż. Marcin Jaraczewski

Kraków, 2024-07-24

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kulińskiego

pt.

“WPLYW CHARAKTERU DOZIEMIENIA ORAZ KONFIGURACJI
KOPALNIANEJ SIECI ROZDZIELCZEJ NA SELEKTYWNOŚĆ
DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH”

Promotor pracy: dr. hab. inż. Adam Heyduk, prof. PŚ

Podstawa prawna oceny:

Pismo przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwa i Energetyka Politechniki Śląskiej w Gliwicach prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina z dnia 5 czerwca 2024 r.

1. CEL I ZAKRES ROZPRAWY

We wstępie rozprawy (rozdział 2.5) Doktorant sformułował jeden główny cel pracy i cztery pomocnicze.

- **Cel główny:** Opracowanie modelu symulacyjnego kopalnianej sieci rozdzielczej SN umożliwiającego analizę złożonych zjawisk ziemnozwarciowych oraz koordynację charakterystyk zabezpieczeń ziemnozwarciowych.
- 1. **Cel pomocniczy 1:** Przeprowadzenie szczegółowej analizy zarejestrowanych danych statystycznych dotyczących działania zabezpieczeń w wybranych kopalniach węgla kamiennego.
- 2. **Cel pomocniczy 2:** Opracowanie cyfrowego modelu symulacyjnego rozdzielczej sieci kopalnianej umożliwiającego zbadanie różnych konfiguracji sieci.
- 3. **Cel pomocniczy 3:** Implementacja układów pomiarowych, takich jak przekładniki prądowe i napięciowe składowej zerowej oraz algorytmy i kryteria działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych, takich jak nadprądowe i admitancyjne.
- 4. **Cel pomocniczy 4:** Porównanie wyników uzyskanych z wykorzystaniem opracowanego modelu z danymi zarejestrowanymi w rzeczywistych sieciach kopalnianych

Istotą problemu badawczego podjętego przez Doktoranta jest przede wszystkim opracowanie modelu symulacyjnego kopalnianej sieci rozdzielczej oraz określenie wymagań projektowych dotyczących zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Przeprowadzone badania, a w szczególności zaproponowane przez Doktoranta kryterium admitancyjne selektywności poprzecznej Y_0 , należy uznać za oryginalne.

2. ANALIZA ZAWARTOŚCI ROZPRAWY I SPOSÓB JEJ MERYTORYCZNEGO PRZEDSTAWIENIA

Opiniowana przeze mnie rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Kulińskiego jest obszernym studium działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średnich napięć (6 kV) z izolowanym punktem neutralnym stosowanych w polskich kopalniach węgla kamiennego, które to zabezpieczenia muszą zapewniać niezawodność oraz szybkość działania, a jednocześnie minimalizować ryzyko niepożądanych wyłączeń fragmentów sieci.

Wyniki badań Doktoranta zostały udokumentowane na 186 stronach rozprawy zawierającej: streszczenie, wykaz ważniejszych oznaczeń, 7 rozdziałów, spis literatury zawierający 105 pozycji oraz spis rysunków, spis tabel i 2 załączniki.

Rozdział 1 wprowadza do tematyki bezpieczeństwa w kopalniach węgla kamiennego w Polsce. Omówiono w nim charakterystykę kopalń węgla kamiennego, uwzględniając specyficzne warunki pracy i środowiska. Skupiono się na roli zabezpieczeń ziemnozwarciowych w utrzymaniu ciągłości pracy zakładów górniczych, ochronie przed zagrożeniami rażeniowymi, pożarowymi oraz wybuchowymi. W podrozdziale 1.4 poruszono temat wypadkowości w polskim górnictwie, pokazując, że mimo ogólnego trendu zmniejszania się liczby wypadków, wciąż istnieje potrzeba dalszych działań mających na celu poprawę bezpieczeństwa pracy.

Rozdział 2 prezentuje wybraną problematykę dotyczącą stosowania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w kopalnianej sieci elektroenergetycznej. Sformułowano w nim tezę pracy, która dotyczy analizy złożonego charakteru zjawisk ziemnozwarciowych w sieciach kopalnianych wraz z uwzględnieniem wysokich wymagań narzucanych przez obowiązujące normy i przepisy. Zdefiniowano cele pracy, w tym opracowanie modelu symulacyjnego kopalnianej sieci rozdzielczej oraz określenie wymagań projektowych dotyczących zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi matematycznych modeli linii kablowych. Doktorant rozpoczyna rozważania od przedstawienia modelu zastępczego w postaci czwórnika kształtu Π , wspomina o modelu J. Martiego oraz modelu Dommela i Meyera. Przedstawiona jest tu też metoda składowych symetrycznych, wraz ze sposobem pomiaru składowej zerowej napięcia i prądu. Ogólnie opisano różne typy zabezpieczeń przeciwzwarciowych wykorzystujące w swoim działaniu składowe zerowe. Dokładniej opisano zabezpieczenia różnicowoprądowe $I_{0>}$ z przekładnikiem Ferrantiego, który przebadano i stwierdzono że działa poprawnie.

Rozdział 4 zawiera argumentację dotyczącą wyboru programu do symulacji zwarć, wybrano ATP-EMTP. Następnie przeanalizowano działanie dwóch modeli zastępczych linii kablowej w postaci czwórnika kształtu Π oraz modelu J. Martiego i stwierdzono że działają tak samo, ale Doktorant zdecydowało się na użycie pierwszego modelu. Dalej Doktorant przedstawia dwa modele rezystancji przejścia w miejscu zwarć wysokorezystancyjnych zaznaczając że na ich podstawie zostanie stworzony model trzeci. Na koniec dokonano wyboru przypadków zwarć do analizy tj zwarć zarejestrowanych w sieci 6kV w KWK Zofiówka i KWK Marcel.

Rozdział 5 najobszerniejszy. W tym rozdziale przeprowadzono szczegółową analizę sześciu przypadków zwarć doziemnych, które wystąpiły w kopalnianych sieciach średnich napięć. Zestawienie obejmowało dwa przypadki zwarć metalicznych oraz cztery przypadki zwarć wysokorezystancyjnych. Dla każdego z tych przypadków podjęto próbę odtworzenia zwarcia w programie symulacyjnym ATP-EMTP. W tym celu, jako model linii kablowej przyjęto model Π . Do modelowania rezystancji zwarcia zastosowano dwa różne dwójniki. W przypadku zwarć niskorezystancyjnych, przyjęto model rezystora o stałej rezystancji, natomiast dla zwarć wysokorezystancyjnych, wykorzystano model dwóch rezystorów o rezystancjach zmiennych w czasie, przełączanych półkresowo. Wartości tych rezystancji znaleziono stosując kryterium najmniejszego błędu absolutnego z różnicy między próbkami przebiegów symulowanych a zarejestrowanymi przebiegami zwarć w kopalni. Następnym krokiem było obliczenie wartości

admitancji składowej zerowej Y_0 dla wszystkich badanych przypadków zwarć. To zadanie wymagało obliczenia wartości skutecznych napięcia oraz prądu składowej zerowej. W tym miejscu napotkano na pewien problem – „literatura ani dokumenty techniczne producentów nie określają wprost, dla jakiego czasu całkowania (liczby pełnych okresów) powinny być obliczone te wartości skuteczne”. Ostatecznie zdecydowano się na czas równy 20 ms (1 pełny okres) oraz 80 ms (4 pełne okresy).

Analizy wykazały, że w każdym z sześciu przedstawionych przypadków, zabezpieczenie admitancyjne zadziałałoby prawidłowo ($Y_0 > Y_{0\text{ast}}$).

Rozdział 6. W rozdziale tym pokazano, że oprócz zabezpieczeń zerowonapięciowych i zerowoprądowych możliwe jest zastosowanie zabezpieczeń admitancyjnych, które także przy pracy równoległej z zabezpieczeniami $I_0 >$, mogą lokalizować uszkodzony odpływ. Dobór dolnej granicy nastawy zabezpieczenia $Y_{0\text{ast}}$ jest stosunkowo prosty i zabezpieczenia admitancyjne z dużym prawdopodobieństwem są w stanie wykryć miejsce zwarcia z zachowaniem zasad selektywności poprzecznej. Miejsce zwarcia w danej linii oraz możliwość pojawienia się wyższych harmonicznych mają znikomy wpływ na poprawność zastosowania tego kryterium. Jednak istotnym dla uzyskania odpowiedniej selektywności aspektem jest kwestia prawidłowego doboru czasu całkowania przy obliczaniu wartości skutecznych wielkości kryterialnych. Optymalny dobór tego czasu powinien zapewnić jednoczesne spełnienie dwóch przeciwstawnych kryteriów: jak najszybsze wykrycie doziemienia i odcięcie dopływu energii do miejsca zwarcia oraz odporność na odkształcenia przebiegów napięć i prądów.

Rozdział 7 to podsumowanie i wnioski. Zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań, wnioski oraz przemyślenia dotyczące dalszych kierunków działań. Podsumowanie w czytelny sposób oddaje zakres rozprawy. Doktorant wyróżnia w nim te fragmenty, które są jego autorskim dokonaniem:

- 1) jako model doziemienia w kablowej sieci z izolowanym punktem neutralnym zastosowano dwie rezystancje zmienne w czasie i przełączane półokresowo.
- 2) określono, że powyższy model odwzorowuje tylko zwarcia wysokorezystancyjne.
- 3) proponuje się uzupełnienie obecnie obowiązującej normy PN-G-42044: 2000 o możliwość zastosowania zabezpieczeń admitancyjnych wykorzystujących kryterium admitancyjne $Y_0 >$ z nastawą zabezpieczenia admitancyjnego według wzoru (7.1)) z adnotacją, że nie mogą one pracować jako jedyne zabezpieczenia zabezpieczające poszczególne odpływy.
- 4) opcjonalnie można dopuścić samodzielne stosowanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych admitancyjnych w polach, w których dopuszczalne jest stosowanie zabezpieczeń zwłocznych o czasie działania powyżej 100 ms. W takich polach można wydłużyć czas analizy danych przez zabezpieczenie do wartości większych niż 80 ms minimalizując wpływ stanu nieustalonego.

3. OCENA MERYTORYCZNA

W świetle przedstawionych wyników analiz i symulacji komputerowych ujętych zwłaszcza w Rozdziałach 5 i 6 główne cele pracy można uznać za zrealizowane. Kolejne rozdziały pracy określają w sposób zrozumiały badania podjęte przez Autora celem rozwiązania postawionego przed nim problemu badawczego.

Doktorant opracował poprawny przegląd literatury, dokonał prawidłowej analizy wybranych przez siebie danych zwarć z kopalń. Na podstawie zebranych przez siebie danych zidentyfikował parametry modelu doziemienia, zaproponował wzór dla nastaw zabezpieczenia admitancyjnego. Dokonał wyboru algorytmu optymalizacji.

Treść rozprawy ma walor poznawczy i może dostarczyć wskazówek oraz informacji w zakresie selektywnych systemów zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Wyniki prowadzonych badań i analiz powinny przyczynić się do poprawy niezawodności oraz

bezpieczeństwa kopalnianej sieci elektroenergetycznej.

Cele rozprawy mogą uznać za osiągnięte przez Doktoranta w oczekiwanym od niego zakresie.

4. UWAGI

Podczas lektury pracy nasunęło mi się kilka spostrzeżeń, które podzieliłem na trzy grupy: uwagi natury redakcyjnej, uwagi ogólne oraz uwagi szczegółowe.

4.1. Uwagi redakcyjne

Rozprawa została zredagowana przez Doktoranta starannie z dbałością o szatę graficzną pracy. Wykresy i ilustracje są wykonane czytelnie i estetycznie. Nieliczne usterki językowe i stylistyczne pojawiają się w rozprawie zarówno w treści rozprawy jak i spisie literatury.

4.2. Uwagi ogólne

Podczas lektury rozprawy nasunęły się wymienione niżej uwagi natury ogólnej:

- W spisie literatury niestety nie znalazła się ani jedna recenzowana praca recenzowana Autora zespołowa ani indywidualna.
- Nie podano parametrów jednostkowych kabli energetycznych (macierzy Z , Y w równaniach 3.1 i 3.2) oraz wynikającej stąd prędkości fali dla różnych częstotliwości, chociaż program ATP-EMTP to umożliwia. Nie można zatem rozstrzygnąć czy dla częstotliwość około 1 kHz i wyższych, należy stosować model linii dłuższej.
- Brakuje przedstawienia zarejestrowanych i symulowanych przebiegów składowej zerowej napięcia. Nie wiadomo więc czy symulacja prawidłowo je odtwarza i w związku z tym czy wnioski dotyczące admitancji Y_0 są w pełni poprawne.
- Rozdział 6 – „każdorazowo zwarcie następowало w 30 ms po rozpoczęciu symulacji” – w tym rozdziale bada się wpływ wyższych harmonicznych na wartość skuteczną prądu I_0 w krótkim odcinku czasu, porównywalnym z jednym okresem. Analizowanie przebiegu nieokresowego pod względem zawartości harmonicznych jest ryzykowne gdyż **harmoniczne mogą zależeć nie tyle od sygnału co od położenia w czasie początku samej ramki czasowej użytej do analizy**. Na przykład im większa różnica między wartością próbki początkowej a końcowej tym większa zawartość wyższych harmonicznych. Nie ma informacji aby autor wziął to zjawisko pod uwagę.

4.3. Uwagi szczegółowe

W rozprawie wychwycono następujące błędy natury szczegółowej:

- str. 32 “ *Metoda ta (składowych symetrycznych) umożliwia obliczenie rozptywu prądów osobno dla każdego układu symetrycznego, następnie obliczyć rozptyw wypadkowy metodą superpozycji.*” – nie jest prawdą, że obliczenie rozptywu prądów dokonuje się osobno dla każdego układu symetrycznego. Dla każdego typu zwarcia istnieje **schemat w składowych symetrycznych** realizujący związki między tymi składowymi w miejscu zwarcia i całym układzie.

- str. 32 „W literaturze przyjmuje się, że $\beta = 0$ gdy w sieci nie pojawia się żadne doziemienie oraz $\beta = 0$ gdy impedancja zwarcia jednofazowego z ziemią jest równa 0Ω (zwarcie metaliczne).” - w tym drugim przypadku beta równa się 1.
- str. 112 – „Natomiast filtr wyższych harmonicznych nie uwzględnia faktu, że w czasie nieustalonym odkształcenia są przebiegami nieokresowymi, stąd widmo częstotliwościowe nie jest dyskretne lecz ciągle.” - nie bardzo wiadomo o co chodzi Autorowi, bo każda analiza numeryczna zakłada pewne okno czasowe co prowadzi do dyskretyzacji w dziedzinie częstotliwości.
- str. 113 – „Przy zwiarcach niskorezystancyjnych można zauważyć pewną zależność, którą najprościej opisuje się następującym wzorem 6.4” – ta zależność jest oczywista dla pądu pojemnościowego (przy zwiarcach niskorezystancyjnych $R=0$)
- wzór 6.10 „ R_{Σ} - całkowita rezystancja całego obwodu” – nie ma czegoś takiego jak ‘rezystancja całego obwodu’, może być rezystancja dwójnika lub część rzeczywista impedancji dwójnika.
- Rozdział 6.8, str. 122 – w tekście „Rozwijając wielomian $Q(s)$ w szereg Taylora pierwszego rzędu wokół punktów ω_{01} , ω_{02} (czyli **pomijając wyrazy drugiego i wyższych rzędów z σ_1 , σ_2**) uzyskuje się...” zakłada się że **tłumienie jest małe** a więc mała jest rezystancja zastępcza widziana w miejscu zwarcia, natomiast z rysunku 6.17 6.18 6.19 widać że tłumienie jest duże bo rezystancja zwarcia jest duża. Zachodzi pytanie czy jest sens analizowania tych przebiegów i wyciąganie z tego wniosków skoro nie spełniają one założeń.

5. KONKLUZJA

Biorąc pod uwagę, omówione powyżej rezultaty rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kulińskiego stwierdzam, iż przedstawił on istotne wyniki badawcze dotyczące opracowanie modelu symulacyjnego kopalnianej sieci rozdzielczej SN umożliwiającego analizę złożonych zjawisk ziemnozwarciowych oraz koordynację charakterystyk zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Doktorant zrealizował postawione we wstępie rozprawy tezy i, moim zdaniem, osiągnął postawiony przed sobą cel.

Mankamentem jest jednak brak własnego dorobku naukowego w formie publikacji recenzowanej.

Praca, moim zdaniem, nie zawiera istotnych uchybień merytorycznych. Wymienione przeze mnie w ‘uwagach’ usterki nie podważają faktu osiągnięcia założonych przez Doktoranta na wstępie celów, jednak nie pozwalają na wnioskowanie o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.

Od strony redakcyjnej rozprawa została złożona przez Autora bardzo profesjonalnie.

Wyniki pracy mgr inż. Krzysztofa Kulińskiego mają charakter aplikacyjny z ukierunkowaniem na zastosowanie zabezpieczeń admitancyjnych do wykrywania miejsca zwarcia, w kopalnianych sieciach średnich napięć, z zachowaniem zasad selektywności poprzecznej.

Przedstawione w rozprawie wyniki spełniają wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). Upoważnia mnie to do przedłożenia Radzie Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach wniosku o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ja Ma