

dr hab. inż. Kazimierz Jaracz,
em.prof. Uniwersytetu KEN w Krakowie
Os. Kościuszkowskie 6/11
31-858 Kraków

Kraków, 15 lipca 2024 rok

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Krzysztofa Kulińskiego

pt. „Wpływ charakteru doziemienia oraz konfiguracji kopalnianej sieci rozdzielczej na selektywność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych”

Niniejsza recenzja została opracowana na prośbę Rady Dyscypliny: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Śląskiej w Gliwicach (pismo RIE-BD.512.25.2024).

Zawartość rozprawy

Kluczowym zagadnieniem utrzymania i ciągłości pracy i bezpieczeństwa załogi w kopalniach jest niezawodność i selektywność zadziałania zabezpieczeń ziemnozwarciowych, zapewniające skuteczną reakcję na zakłócenia w sieci elektrycznej kopalni .

Podjęta w pracy tematyka związana jest z tymi zagadnieniami.

Recenzowana rozprawa została zredagowana na 186 stronach wydruku komputerowego.

Zawiera 6 rozdziałów, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, podsumowanie i wnioski, literaturę, spis rysunków, spis tabel, dwa załączniki w postaci aneksów tabel i przebiegów, streszczenie.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematu i zawiera treści podręcznikowe, ogólnie znane oraz uzasadnienie wyboru tematu pracy doktorskiej. Treści podręcznikowe stanowią wartość naddaną i bez umniejszania wartości pracy można je było nie dopisywać do rozprawy.

W rozdziale 2 sformułowano cel naukowy pracy, to jest opracowanie modelu symulacyjnego kopalnianej sieci rozdzielczej średniego napięcia (SN) umożliwiającego badanie i analizę złożonych zjawisk ziemnozwarciowych oraz cel użyteczny, czyli określenie wymagań

projektowych doboru nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz sformułowanie wytycznych do opracowania nowej normy uwzględniającej nowoczesne rozwiązania zabezpieczeń. Sformułowana teza pracy jest dość rozbudowana i przez to niezbyt precyzyjna. Nie stanowi to jednak przeszkody w odczytaniu zamierzeń dookreślonych w celu pracy.

W rozdziale 3 przedstawiono specyfikację kopalnianej sieci rozdzielczej, przyjmując za kryterium sposoby połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią. Wyszczególniono:

- sieci skompensowane,
- sieci uziemione przez rezystor,
- sieci z izolowanym punktem neutralnym.

Linia kablowa jest obiektem o stałych rozłożonych (obiektem typu continuum). Tworzenie modeli uproszczonych ułatwiających jej analizę wiąże się z przyjęciem wielu założeń upraszczających. W dalszych badaniach symulacyjnych Autor przyjmuje model czwórnika typu π , lub łańcucha tych czwórników. Należałoby uzasadnić ten arbitralny wybór. Rozważa zabezpieczenia zerowonapięciowe, zerowo prądowe, czynno i bierno – mocowe kierunkowe, admitancyjne, z układami Holmgreena na bazie przekładników Ferrantiego, cyfrowymi wskaźnikami zabezpieczającymi (multi Muz/megaMuz). Analizuje błędy wnoszone przez te rozwiązania w prawidłowym wyłączeniu sieci kopalnianych przy zwarciach i doziemieniach.

W rozdziale 4 przedstawiono analizę możliwości badań rozległej kopalnianej sieci rozdzielczej metodą symulacji cyfrowej przez zastosowanie odpowiedniego środowiska programowego. Uzasadniono dobranie środowiska symulacyjnego *Alternative Transients Program – Elektromagnetic Transients Program* (ATP – EMTP).

Środowisko to umożliwia modelowanie sieci elektroenergetycznych składających się z dużej liczby węzłów i gałęzi, wielu źródeł napięciowych jednocześnie (<https://www.elektro.inf.pl>).

Konkurencyjnym programem jest MATLAB/Simulink (yadda.icm.edu.pl, EMTP oraz MATLAB/Simulink). Podstawą analizy symulacyjnej były dwa modele sieci: typu π oraz model zCable J. Mortiego (rys. 4.1, rys. 4.2). Rozpatrzono kilka arbitralnie wybranych konfiguracji przy różnych parametrach sieci i dwóch sytuacji zwarcia doziemnego – zwarcia niskorezystancyjnego (model przedstawiony na rys. 4.5a) i wysokorezystancyjnego - model na rys. 4.5b. Dokonano dopasowania modelu zwarcia doziemnego do zarejestrowanych danych

W rozdziale 5 przeprowadzono dyskusję z analizy wybranych zarejestrowanych przebiegów $3I_O$ w przypadkach zwarć doziemnych w kopalniach węgla kamiennego Zofiówka i Marcel i wyników symulacji. Analiza błędów dla przebiegów $3I_O$ wykazała zbieżność wyników.

Dopasowanie modelu zwarcia doziemnego do zarejestrowanych danych przeprowadzone zostało metodą Monte Carlo z wykorzystaniem, interpolacji kwadratowej i metody najmniejszego błędu absolutnego.

W dalszej części rozdziału sprawdzono możliwość zastosowania do kontroli zwarć w sieci zabezpieczeń admitancyjnych, realizowanych przez stosowane w górnictwie sterowniki polowe, których zadaniem jest wykrywanie zwarć doziemnych na podstawie zmiany admitancji sieci Y_0 , określonej wzorem (5.9).

W rozdziale 6 przeprowadzono analizę selektywności (poprzecznej) sieci modelowej na wariacje admitancji Y_0 . Do badań przyjęto model π sieci kablowej (rys. 6.1). dla przyjętego modelu sieci obliczono przebiegi napięć i prądów dla zwarć występujących w wybranych punktach pola 1 rozdzielniczy RO-1, przy różnych wartościach rezystancji zwarcia (tabela 6.2). Określono wartości skuteczne wybranych przebiegów (tabela 6.3). dla poszczególnych przypadków sformułowano wnioski dotyczące selektywnego wyłączenia uszkodzonej linii.

W oparciu o wzór 6.2 dokonano obliczeń minimalnych wartości nastaw zabezpieczeń admitancyjnych dla wybranych odplywów sieci średniego napięcia z izolowanym punktem neutralnym bez udziału wyższych harmonicznych i z ich udziałem. Stwierdzono, że wpływ wyższych harmonicznych na wartość admitancji Y_0 jest znikomy.

Zbadano, że wpływ wartości rezystancji zwarcia na moc czynną wydzielaną w miejscu zwarcia jest duży. Najbardziej niekorzystna konfiguracja występuje wtedy, gdy rezystancja zwarcia ma wartość zbliżoną do modułu impedancji zastępczej widzianej z miejsca zwarcia. Obliczono graniczną wartość rezystancji ($28,7 \Omega$) w miejscu zwarcia doziemnego, powyżej której drgania tłumione składowych przejściowych nie występują.

Istotne elementy rozprawy

Podjęta problematyka pracy dotycząca bezpieczeństwa kopalni z punktu widzenia pewności i selektywności zadziałania zabezpieczeń ziemnozwarciowych jest ważna i potrzebna dla praktyki górniczej. Trudne warunki otoczenia pracy urządzeń stwarzają ryzyko uszkodzeń izolacji, zwarć doziemnych inicjujących powstanie pożarów lub metanowych wybuchów.

Do istotnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- stwierdzenie wystarczalności do badań zjawisk ziemnozwarciowych posiłkowania się modelem π , lub łańcuchem czwórników π .
- zastosowanie w modelu doziemienia sieci kablowej z izolowanym punktem neutralnym dwóch rezystorów o rezystancji zmiennej w czasie, przełączanych półokresowo, do badania zwarć wysokorezystancyjnych,
- rejestracja interesujących przypadków zwarć w kopalniach KWK Zofiówka (zwarcie wysokorezystancyjne na 495 metrze linii kablowej w polu nr 22 rozdzielniczy RGD-2), KWK Marcel (zwarcie wysokoimpedancyjne na 725 metrze linii kablowej w polu nr 16 rozdzielniczy R-604),

- poparta obliczeniami, propozycja uzupełnienia obecnie obowiązującej normy PN-G-42044:2000 w możliwość stosowania uzupełniających zabezpieczeń admitancyjnych $Y_0 > z$ nastawą dobieraną według wzoru (7.1),
- analiza skuteczności zabezpieczeń admitancyjnych w wykrywaniu zwarć doziemnych,
- wskazanie możliwości dopuszczania ziemnozwarciowych zabezpieczeń admitancyjnych w polach z zabezpieczeniami zwłocznymi (o czasie działania ponad 100 ms),
- wykazanie, że wpływ wyższych harmonicznych na wartość Y_0 w poszczególnych miejscach sieci jest znikomy i przyjęcie współczynnika bezpieczeństwa $k_b = 1,2$ (wzór 6.2) oraz czasu całkowania $t = 80$ ms wystarczają dla selektywnego wykrywania zwarć doziemnych w sieci kopalnianej,
- określenie optymalnych wartości czasu całkowania dla przekaźników zabezpieczeniowych, przy obliczeniach wartości skutecznych wielkości kryterialnych, zapewniających szybkie wykrycie doziemienia sieci

Rozprawa doktorska posiada charakter homogeniczny. Kolejność rozdziałów jest właściwa, odwołania do bibliografii zamieszczono. Dołączono w niej wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, spis rysunków, spis tabel, tabele niewykorzystanych danych, innych przebiegów nieuwzględnionych we właściwej części pracy.

Uwagi szczegółowe

Staranna lektura pracy nasunęła mi kilka uwag - nie umniejszających jej wartości. Są to uwagi redakcyjne, edytorskie, metodyczne.

- W jaki sposób rejestrowano przebiegi I_0 w przypadku zwarć doziemnych w kopalniach ?
- Wobec wielu innych stosowanych cyfrowych narzędzi symulacyjnych, jakie argumenty zdecydowały o zastosowaniu środowiska ATP-EMT do badania stanów dynamicznych sieci kopalnianych ?
- Nieuporządkowany alfabetycznie spis bibliograficzny utrudnia lekturę pracy.
- W pracy pod wzorami nie wszystkie symbole są opisane i skomentowane.
- Na str. 24 sformułowanie : „...prąd zaczyna płynąć przez reaktancję indukcyjną dławika zawiera błąd logiczny – hipostazę językową; powinno być, prąd płynący przez dławik. Na tej samej stronie podobny błąd z rezystancją.
- Str. 26; jest „wydostania się napięcia”; p.b. pojawienia się napięcia.
- Str. 27 wywołana bibliografia należy już do historii elektrotechniki. Podobnie na str. 28.
- Błąd stylistyczny na str. 28.
- Str. 29, we wzorach (3.3), (3.4) niekompletny opis znaczenia fizycznego zastosowanych symboli.

Str. 30, we wzorze (3.6) symbole macierzy powinny być pogrubione. Jakie jest źródło tej zależności?

- Str. 31, we wzorze (3.9) stosowane są nieuprawnione symbole iloczynu splotowego.

- Na str. 32 występują drobne błędy edytorskie.

Na str. 32 wywołana jest bibliografia nieopisana [62].

-Str. 39 we wzorze (3.19) i odpowiadającym komentarzu zastosowano inne oznaczenia kąta przesunięcia fazowego.

Na str. 40 pod rys. 3.11, p.b. ..zjawiska aliasingu (wynikającego z niejednoznacznej reprezentacji sygnału okresowego przez ciąg próbek pobranych w równych odstępach) ...

- Na str. 50 skróty zastosowane po raz pierwszy powinny mieć podane w nawiazach swoje rozwinięcia. Zatem p.b EMTP (Electromagnetic Transients Program), ATMP-EMTP (Alternative Transients Program – Elektromagnetic Transients Program). Dalej dopisać - konkurencyjnym programem jest MATLAB/Simulink. [yadda.icm.edu.pl EMTP oraz MATLAB/Simulink].

-Na str. 53 w modelu zCable występują nienormowane symbole, które należałoby opisać.

- Na str. 98 błąd edytorski; p.b. kryterium admitancyjnego.

- Na str. 103 błąd stylistyczny.

-Na str. 107 błąd stylistyczny.

- Na str. 128 błąd stylistyczny.

Wnioski końcowe

Przygotowanie przez mgr inż. Krzysztofa Kulińskiego przedstawionej do recenzji pracy wymagało zdobycia odpowiednio poszerzonej wiedzy z zakresu elektrotechniki, sieciowych instalacji kopalnianych, automatyki zabezpieczeniowej w kopalniach, metod i narzędzi cyfrowej symulacji, modelowania systemów.

Przyjęta teza zawiera elementy nowości i została udowodniona. Praca stanowi wartościowe osiągnięcie naukowe i wdrożeniowe Autora. Do rozwiązania problemów użyto właściwych metod.

Została napisana językiem poprawnym, rysunki wykonano starannie, zawierają nieliczne uchybienia oznaczeniowe elementów schematów ideowych, które wynikają ze składin zastosowanych edytorów (np. brak węzłów połączeń elektrycznych, niezgodne z polską normą symbole diod, cewek indukcyjnych, za małe symbole oznaczeń osi współrzędnych). Inne uwagi mają charakter kosmetyczny lub polemiczny i nie umniejszają wartości pracy.

Uwzględniają wyżej wymienione uwagi stwierdzam, że niniejsza rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk inżynieryjno – technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku i wnioskuję o dopuszczenia jej do publicznej obrony.

Krzysztof Janek

Biorąc pod uwagę ogromny nakład pracy związanej z przygotowaniem rozprawy i naukową rzetelność, deklaruję poparcie wniosku o jej wyróżnienie, gdyby taki się pojawił się, po publicznej obronie tej rozprawy.

Krzysztof Janek