

Prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko
Politechnika Lubelska
Katedra Elektroenergetyki
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Lublin 01.08.2023 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 3.08.2023

Zarejestrowano pod nr

Podpis 

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Jakuba Gajdzicy

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo Hutniczej dr hab. inż. Ryszarda Sroki prof. AGH z dnia 27.04.2023 r.

Tytuł rozprawy

„Analiza czynników determinujących rozplływ prądu zwarcia dla oceny bezpieczeństwa porażeniowego w stacji elektroenergetycznej”

1. Wybór tematu rozprawy

Wydawałoby się, że temat podjęty w rozprawie ma długą historię i doczekał się standardowych rozwiązań – na świecie zbudowano przecież setki tysięcy stacji elektroenergetycznych, a ich bezpieczeństwo wydaje się być opanowane. Autor rozprawy radykalnie nie zaprzecza temu stwierdzeniu przytaczając bogate piśmiennictwo związane z problematyką rozplwywu prądu zwarcia doziemnego w układach uziomowych. Doktorant zwraca jednak uwagę na słabe strony stosowanych metod, które być może nie prowadzą do dramatycznych błędów w ocenie stanu bezpieczeństwa porażeniowego, ale mimo wszystko zawierają nieścisłości. Z pewną satysfakcją odnajduję w niektórych wskazanych w rozprawie nieścisłościach wątpliwości, które miałem 40 lat temu rozpatrując problem rozplwywu prądu zwarcia w kontekście poprawności pracy zabezpieczeń odległościowych. Można powiedzieć, że konieczność rozwoju infrastruktury elektroenergetycznej wymusza większe wymagania w zakresie bezpieczeństwa porażeniowego – stacje budowane są bliżej



miejsce zamieszkania ludzi, większe są moce transformatorów, więcej jest linii kablowych wysokiego napięcia, bardziej rozbudowana jest sieć połączeń metalowych pod powierzchnią ziemi. Wszystkie te elementy powinny być odpowiednio odwzorowane.

Można także powiedzieć, że Doktorant podejmując powyższy temat wykazał się swego rodzaju odwagą i przeświadczeniem, że dzięki swojemu komputerowemu warsztatowi badawczemu i bardzo dobremu rozpoznaniu problemu, zaproponuje do jego rozwiązania podejście mające cechy oryginalności.

Tak więc tematykę pracy należy uznać za ważną i aktualną, postawienie problemu naukowego należy ocenić pozytywnie, a jego ostateczne rozwiązanie uznać za prawidłowe.

2. Zawartość rozprawy oraz jej ogólna ocena

Opiniowana rozprawa zawiera 174 strony tekstu (9 rozdziałów) wraz z ilustracjami i wzorami (od strony 150 do 162 opis metody obliczania parametrów transformatorów) oraz wykazem literatury obejmującym 190 pozycji (od strony 163).

Pozycje literatury zostały zestawione prawidłowo, co więcej są one Autorowi znane, ponieważ cytuje je obszernie i w odpowiednich miejscach rozprawy. Zestawienie literatury zawiera zarówno pozycje fundamentalne (sprzed 100 lat) jak też całkowicie nowe, zawiera też stosowne normy. Rozczarowujący tylko jest dla mnie brak w spisie literatury książki napisanej przez profesorów Bernasa i Cioka „Modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego”, która moim zdaniem, pomimo roku wydania 1977 ma wciąż fundamentalne znaczenie, także w obszarze tematycznym rozprawy.

Teza rozprawy podana na str.11 ma następującą postać:

Poprawna ocena bezpieczeństwa porażeniowego w stacjach elektroenergetycznych uwarunkowana jest zastosowaniem zaawansowanych modeli elementów układu elektroenergetycznego determinujących rozptyw prądu zwarcia jednofazowego oraz metod jego wyznaczania

Tezę tę oceniam jako ryzykowną. Analizując jej treść można dojść do wniosku, że jeśli nie stosuje się wspomnianych „zaawansowanych modeli...” to ocena nie będzie poprawna, albo co najmniej może być niepoprawna. Tymczasem ocena stanu bezpieczeństwa porażeniowego jest zaliczana do „inżynierskiej klasyki projektowej” i po przebrnięciu przez cały materiał rozprawy dochodzę do wniosku, że bezpośrednio wdrożenie metod proponowanych w rozprawie do wspomnianej klasyki może być trudne. Można ewentualnie wyrazić przekonanie, że zaawansowane metody i modele zastosowane w rozprawie zostaną przetworzone do postaci funkcjonalnego inżynierskiego oprogramowania typu Etap czy Power Factory. Moim zdaniem, dysponując odpowiednim oprogramowaniem i metodyką modelowania można wypracować lepsze, dokładniejsze standardy i taki efekt pracy byłby wyraźnie bardziej użyteczny. Poruszając się po obszarze praktyki elektroenergetycznej należałoby określić wyraźnie „co dalej ...” a tego w rozprawie brakuje. Można jednak uznać, że te zastrzeżenia Doktorant rozwiąże w ramach kontynuacji prac, na przykład jako realizator grantu finansowanego przez operatorów sieci elektroenergetycznych.

Tu warto przypomnieć konstrukcję normy zwarciowej IEC 60909, w której poprzez wprowadzenie współczynników korygujących wartości impedancji generatorów z jednej strony zachowano prostotę i inżynierski charakter obliczeń, a z drugiej odwzorowano złożony (w sensie zjawisk i ich modelowania) wpływ generatorów synchronicznych.

Doktorant określił, że celem rozprawy było „opracowanie zaawansowanej metody symulacyjnej ...” i cel ten z powodzeniem

zrealizował, przy zastrzeżeniu, że program EMTP-ATP traktowany był jako dostępna „czarna skrzynka”, którą Autor „dostroił” dla zdefiniowanych potrzeb obliczeniowych. Można dyskutować, czy umiejętne wykorzystanie „jądra” zaawansowanego narzędzia obliczeniowego EMTP-ATP oznacza „opracowanie zaawansowanej metody symulacyjnej”. Doktorant zaproponowaną metodę nazywa „symulacyjną”, ale w gruncie rzeczy używając narzędzia do symulacji zmieniających się w czasie wielkości elektromagnetycznych (program EMTP-ATP) wykonywane są obliczenia dla stanu ustalonego (quasi – ustalonego). Powtórzenie kilkadziesiąt razy przymiotnika „symulacyjny” i rzeczownika „symulacja” utrudnia zrozumienie rozprawy.

Powyższa, nieco krytyczna ocena relacji „zawartość pracy – praktyka inżynierska” nie wpływa na pozytywną ocenę poziomu naukowego rozprawy, który oceniam bardzo wysoko. Nie przeszkadza w tej ocenie nieco „tutorialowa” zawartość niektórych jej fragmentów (rozdział 2 oraz 4), która mogłaby być zastąpiona na przykład opisem wewnętrznych metod i algorytmów programu EMTP-ATP, o których Autor nie wspomina nawet ani jednym zdaniem, choć właściwie dzięki nim osiąga końcowy sukces obliczeniowy.

3. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Rozdział 2 rozprawy przedstawia problemy zagrożenia porażeniowego w stacjach elektroenergetycznych. Mam wątpliwości czy przypomnienie dość powszechnie znanych informacji o wpływie prądu elektrycznego na organizm człowieka było uzasadnione – być może dla zapewnienia kompletności tekstu pracy? W dalszej części rozdziału Doktorant zgłasza zasadnicze wątpliwości co do zapisów normy PN-EN 50522 dotyczących obliczania prądu uziomowego. Wątpliwości te są słuszne bowiem norma nie doprecyzowuje, jak liczyć współczynniki

redukcyjne linii oraz impedancje ekwiwalentne - przewodów odgromowych linii napowietrznych jak też żył powrotnych linii kablowych. Problem w tym, że obliczenia te co do zasady są przybliżone, co, z inżynierskiego punktu widzenia jest dopuszczalne. Doktorant widzi tu jednak radykalne rozwiązanie – trzeba liczyć według „zaawansowanych metod symulacyjnych” – które właśnie w rozprawie będą zaprezentowane, bowiem to jest jej cel. Pomimo sporej precyzji zamieszczonych wywodów, odczuwalny jest jednak brak odniesienia do innych standardów niż norma PN-EN 50522 (np. IEEE, choć są one zamieszczone w spisie literatury).

Rozdział 3 poświęcony jest modelowaniu stacji do analizy rozplywu prądu zwarcia. Na rys. 3.1 zamieszczono ilustrację graficzną tego modelu. Jest ona bardzo kształcąca, ale muszę wskazać w tym miejscu pewne uwagi. Na rysunku kolorem czerwonym pokazano szynę z doziemieniem i dopływające do niej prądy. Otóż po pierwsze fazy powinny być na rysunku opisane (L1, L2, L3) – ale to sprawa drobna. Po drugie należałoby się trzymać oznaczenia prądu zwarcia indeksem K (I_K wg PN-EN 60909), a do oznaczania kabli wybrać literę C, pozostając przy literze E dla prądu wpływającego do ziemi. Po trzecie prądy wpływające do przewodów odgromowych, żył powrotnych i punktu gwiazdowego transformatora powinny mieć oznaczenie za pomocą dwóch indeksów. Pomimo wielokrotnego przeglądania pracy wciąż wydaje mi się, że prąd I_L to prąd linii (a nie przewodów odgromowych), moim zdaniem lepsze oznaczenie to I_{L0} lub I_{Lg} . Wreszcie po czwarte – na rysunku 3.1 (także na rys. 2.4) fazy L2 i L3 linii napowietrznych, kablowych i transformatorów są „martwe”. Można wnioskować, że nie płyną nimi żadne prądy, bo przecież zwarcie dotyczy fazy L1. Ale rzeczywistość jest inna. Przewodami faz L2 i L3 przepływają prądy wyrównawcze, przy czym dla linii L:

$$I_{L2L} = I_{L3L} = I_{0L} - I_{1L}$$

A. W.

(analogicznie dla kabli i transformatorów). Co więcej fazą L1 linii L nie dopływa prąd o wartości $3I_{0L}$ (jak wskazuje rysunek 3.1 oraz 2.4) ale

$$I_{L1L} = I_{0L} + 2I_{1L}$$

Pomimo tych oczywistych nieścisłości wypadkowy prąd zwarcia dalej jest równy sumie trzykrotnych prądów zerowych poszczególnych elementów (linii, kabli, transformatorów), więc wyniki obliczeń nie są zagrożone. Tym nie mniej ranga dokumentu (rozprawa doktorska) zobowiązuje do precyzji wywodów i ilustracji.

Rozdział 4 Doktorant poświęcił ten rozdział problematyce modelowania układów uziomowych. Stosując metodę prądów symulowanych (MPS) porównano rezystancje uziomów pionowych oraz kratowych z wartościami podanymi w literaturze, przy różnym poziomie dokładności obliczeń. Następnie pokazano sposób wyznaczania rozkładu potencjału w otoczeniu uziomu. Podchodząc z uznaniem do zademonstrowanych w tym rozdziale umiejętności modelowania układów uziomowych, nie jestem przekonany co do celowości zamieszczania tych rozważań, bowiem droga do realizacji głównego celu pracy mogła tę problematykę nieco ominąć.

Rozdział 5 dotyczy modelowania transformatorów w analizie rozptyłów prądu zwarcia. Oczywiście jest, że im większa część prądu zwarcia płynąc przez elementy uziomu kratowego wróci do punktu gwiazdowego transformatora (transformatorów) tym mniejsza jego część wpływając do ziemi spowoduje zagrożenie porażeniowe (pokazano to na rys. 5.1, 5.2.).

Bazując na rozważaniach prof. Bajorka (monografia z 1983 r.) Doktorant stworzył modele macierzowe transformatora trójzwojowego i dwuzwojowego. Następnie określił (za pomocą kilku metod i narzędzi komputerowych) impedancję, którą nazwał „impedancją dla prądów powrotnych” wyznaczaną w układzie pokazanym na rys. 5.4 i 5.8. Układ ten wydaje się identyczny z układem do wyznaczania impedancji

transformatora dla składowej zerowej, czy tak rzeczywiście jest? (szczególnie dla jednostki dwufazowej). Mogę nadmienić, że próbowałem również przed laty budować model transformatora przy wykorzystaniu podobnego podejścia. Podałem się jednak nie widząc szans na wyznaczenie parametrów modelu, dla którego konieczne były bardzo specjalistyczne dane konstrukcyjne transformatora i wiedza na poziomie konstruktora tych maszyn. Doktorant zdobył zarówno te parametry jak i taką wiedzę. Ale tu znów mam wątpliwość – aż tak dokładne podejście do modelowania transformatorów prowadzi nieco inną ścieżką niż główny cel pracy. A na dodatek jeszcze publikacja IEC 14/234 z 1995 r. wskazuje na nieliniowości związane z przepływem strumienia magnetycznego (dla jednostek o 3 kolumnach) drogami przez olej, kadz i powietrze. Ten fakt poddaje nieco w wątpliwość wysiłki mające na celu dokładne wyznaczenie wartości poszukiwanej impedancji, albowiem jej wartość zależy (trochę) od prądu dopływającego od układu uziomowego do punktu gwiazdowego transformatora.

Rozdział 6 poświęcony jest analizie modeli linii napowietrznych. Po zaprezentowaniu modeli Doktorant przedstawia równanie węzłowe (6.7). Jak z wektora wolnych wyrazów oznaczonego symbolem C eliminowane są prądy, tego już nie wyjaśnia, a to ma bardzo duże znaczenie, jeśli impedancja Z_L miałaby być od tych prądów niezależna. Warto byłoby wyjaśnić te kwestie, bo zależność (6.8) to już trochę zbyt ogólnikowe wyrażenie – każdą impedancję na świecie można zapisać w ten sposób. Dalszy ciąg rozdziału 6 to już modelowanie linii wielofazowej niejednorodnej (o ile taka definicja jest odpowiednia) i prezentacja modeli opracowanych w programie EMTP-ATP oraz w środowisku MATLAB wraz z przykładem ich wykorzystania. Opanowanie warsztatu komputerowego w tym zakresie jest niewątpliwie osiągnięciem Doktoranta.

Zademonstrowano przykład wyznaczenia współczynnika k_{RL} określającego relacje prądu zwarciovego (zwarcie na końcu linii) do prądu odpływającego przewodami odgromowymi. Niestety nie wiadomo w oparciu o jaki algorytm wartości te zostały wyliczone ani jak się mają tak obliczone wartości do uzyskanych metodami uproszczonymi.

Rozdział 7 poświęcony jest analizie linii kablowych przy różnych założeniach co do sposobu uziemiania żył powrotnych (BEB, SPB, CB). Wydaje się, że w opisie wielkości występujących w rozprawie (str.9) wyjaśnienia dla tych symboli są zamienione. Materiał rozdziału to modelowanie linii kablowych WN i SN jednorodnych i wielofazowych (choć nie bardzo wiem co ten termin oznacza), poprzez zastosowanie programu EMTP - ATP we współpracy ze środowiskiem MATLAB. W rezultacie możliwe jest wyznaczenie współczynników k_{RK} dla określonego kabla w określonej konfiguracji (jaka część prądu zwarciovego powraca żyłami powrotnymi).

Rozdział 8 to kluczowy rozdział rozprawy. Wszystkie dotychczasowe rozważania Doktorant wykorzystuje w celu określenia rozptyłu prądów zwarcia doziemnego i związanych z nim wielkości. Badany układ zawiera 3 węzły 110 kV oraz dokładnie badaną stację K z szynami 15 kV i kilkunastoma liniami kablowymi. Dla napięcia 110 kV mamy linie napowietrzne (odcinki jednotorowe i dwutorowe) oraz linię kablową. Rezystancje uziomów słupów oraz długości przęseł są zróżnicowane. Do tego wszystkiego dochodzi układ uziomowy badanej stacji. Dysponując instrumentarium z zakresu modelowania oraz odpowiednim narzędziem komputerowym Doktorant jak „inżynierski wirtuoz” wykorzystuje jego możliwości, wyznaczając wszystkie poszukiwane wielkości – czyli prąd dopływający, prądy odpływające, prądy w uziomach słupów i w żyłach powrotnych kabli, a finalnie rozkład napięć dotykowych na terenie

analizowanej stacji. Do tego Autor przeprowadza obliczenia porównawcze według zaleceń normy PN-EN 50522, wskazując na ich ułomność, szczególnie w zakresie wyznaczania napięcia uziomowego. Jest to bardzo dobry i szczególnie przekonujący fragment rozprawy. Zawsze miałem jednak wątpliwość (którą zgłaszam) – jak traktować system elektroenergetyczny który niewątpliwie istnieje także poza węzłami P, M, C. Te stacje też mają swoje układy uziomowe, swoje linie i transformatory. Doktorant modeluje je (rys.8.5) za pomocą pojedynczych rezystancji – jak je w praktyce wyznaczyć?

Rozdział 9 Doktorant rozpoczyna go niezbyt szczęśliwie stwierdzeniem, że „rozprawa stanowi istotny wkład w dziedzinie modelowania układów elektroenergetycznych ...”. Należy stwierdzić, że nawet jeśli tak jest (a moim zdaniem jest), to pole dla takich stwierdzeń zarezerwowane jest dla oceniających, a nie dla Autora rozprawy. Dalej Autor wymienia uzyskane rezultaty, które bez wątpienia są wartościowe i oryginalne, szczególnie w zakresie inteligentnego wciągnięcia programu EMTP-ATP do obliczeń, które przecież nie odnoszą się do stanów przejściowych. Uzyskanie przewagi nad obliczeniami realizowanymi wg norm Autor kwituje opinią, że trzeba stosować od dziś „jego” metodę i podejście. Według mojej opinii – nieco innej – teraz trzeba pracować nad udoskonaleniem normy, przyjmując wyniki uzyskane w rozprawie jako układ odniesienia.

Na koniec muszę podnieść jedną tylko kwestię edycyjną. Zasadą przestrzeganą przez renomowane wydawnictwa jest „kursywienie” symboli wielkości fizycznych, przy zachowaniu antykwy (czcionka prosta) do indeksów (z wyjątkiem indeksów porządkujących). Zasada ta dotyczy także macierzy. Bezpośrednie korzystanie z edytora równań Mathtype nie pozwala na utrzymanie tej zasady – i rozprawa jest dowodem na

podporządkowanie się Autora temu narzędziu, bo właściwe relacje „kursywa – antykwa” nie zostały dochowane. Przy dalszych publikacjach warto o tym pamiętać.

4. Uwagi końcowe, podsumowanie, spełnienie wymogów ustawowych

Odpowiednie przepisy (zacytowane w dalszej części recenzji) wymagają, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. To wymaganie opiniowana rozprawa bez wątpienia spełnia, a sposób rozwiązania problemu przedstawiony w pracy jest obiecujący i dający możliwość praktycznego wykorzystania. Ustawa formułuje pod adresem doktoranta oczekiwanie, aby wykazał się on wiedzą w danej dyscyplinie, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętnością przedstawienia jej wyników. Te wszystkie cechy i umiejętności mgr inż. Jakub Gajdzica niewątpliwie posiada, co udowodnił w rozprawie i w wykonanych w ramach tej rozprawy obliczeniach symulacyjnych. Jego wiedza teoretyczna w dyscyplinie elektrotechnika (odpowiadająca jej obecna nazwa wynikająca z Rozporządzenia MEiN z dnia 11 października 2022 r. - automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne) została przekonująco udowodniona, a przedstawione przez recenzenta uwagi mają charakter dyskusji naukowej i nie obniżają wysokiej oceny rozprawy. Rozprawa wykracza poza poziom przeciętny, a ustawowe wymagania spełnia z nadmiarem.

Lista istotnych wniosków i osiągnięć rozprawy, które powinny być uznane za jej i Doktoranta oryginalny dorobek zostały wymienione na stronach 148-149 (rozdział 9). Recenzent listę tę akceptuje i potwierdza, pomimo wskazanych wyżej uwag.

Biorąc przedstawioną wyżej ocenę pod uwagę stwierdzam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Jakuba Szymona Gajdzicy odpowiada w

pełni wymaganiom ustawowym stawianym przed rozprawami doktorskimi (art. 13 ust 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki w związku z art. 179 ust.1 i ust 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Prof. Kacjko