



Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Mateusza Szablckiego: “Obszarowa adaptacyjna automatyka zabezpieczeniowa linii elektroenergetycznych WN z odczepowo przyłączonymi źródłami wiatrowymi”

1. Podstawa wykonania recenzji

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie Uchwały Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej z dnia 19 marca 2013 roku. Podstawą wykonania jest opracowanie pod ww. tytułem o objętości 152 stron, w tym spis literatury zawierający 155 pozycji publikacji (w tym książki, artykuły, dokumenty, katalogi), 12 odniesień do stron internetowych oraz dwa załączniki o objętości 20 stron.

2. Teza naukowa i zakres pracy

Autor sprecyzował tezę naukową w rozdziale 1 na stronie 8 pracy. Zdaniem Doktoranta:

Wykorzystanie technik adaptacyjnych w obszarowych systemach automatyki bazujących na systemach wieloagentowych umożliwi poprawę detekcji i eliminacji zakłóceń zwarciovych przez impedancyjne kryterium decyzyjne układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej ciągów liniowych z odczepowo przyłączonymi źródłami wiatrowymi.

Dla udowodnienia powyższej tezy Doktorant przyjął następujący zakres swojej pracy:

- w rozdziale drugim przedstawił syntetyczny opis algorytmów pomiarowych i decyzyjnych stosowanych w istniejących – „klasycznych” – bezłączowych i łączowych zabezpieczeniach odległościowych linii elektroenergetycznych;
- w rozdziale trzecim scharakteryzował warunki pracy zabezpieczeń odległościowych linii w strukturach sieciowych, do których odczepowo przyłączono źródła wiatrowe; przedyskutował wpływ wystąpienia czynników fałszujących na poprawność wyznaczania impedancji i wypracowania decyzji wykonawczych, koncentrując rozważania przede wszystkim na: zjawisku spływu prądów zwarciovych, niezerowej wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, przedzakłóceniovym obciążeniu linii elektroenergetycznej oraz zachowaniu się źródeł wiatrowych podczas zakłóceń zwarciovych; przeprowadził symulacyjną weryfikację poprawności działania zabezpieczeń odległościowych linii, określając skalę błędów algorytmów po-

miarowego oraz algorytmów decyzyjnych z uwzględnieniem specyfiki zabezpieczeń bezłączowych i łączowych;

- w rozdziale czwartym opisał koncepcję Obszarowej Automatyki Zabezpieczeniowej Układów Odczepowych (OAZUO) opartej na systemie wieloagentowym o wielowymiarowej postaci struktury; zaproponował model agenta dedykowanego dla OAZUO, precyzując charakteryzujące go atrybuty; określił zbiór zadań przewidzianych do realizacji przez OAZUO, wyodrębniając zadanie podstawowe (funkcja automatyki zabezpieczeniowej) i zadanie dodatkowe (funkcja automatyki Smart Grid); zaproponował przykładową realizację OAZUO dla wybranego fragmentu sieci dystrybucyjnej WN, zamieszczając wytyczne dotyczące kształtowania struktury OAZUO dla dowolnego zbioru połączonych obiektów elektroenergetycznych;
- w rozdziale piątym zaproponował procedurę wykonywania zadania podstawowego OAZUO, jako szeregu podzadań, do których zaliczył: podzadanie identyfikacji stanu pracy sieci, podzadanie adaptacji funkcjonalnej i konfiguracyjnej OAZUO oraz podzadanie realizacji funkcji zabezpieczeniowej; opisał założenia dotyczące układu wzajemnych powiązań i wymiany informacji między blokami realizacji podzadań zadania podstawowego oraz określił zbiór danych wejściowych niezbędnych do poprawnej realizacji zadań OAZUO;
- w rozdziale szóstym sformułował nowe metody wyznaczania składowych impedancji niewrażliwe na: odczepowe przyłączanie źródeł wiatrowych, wystąpienie zwarć pośrednich o niezerowej wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, stan pracy chronionego fragmentu sieci w warunkach przedzakłóceniovych oraz działanie układów regulacji źródeł wiatrowych determinujące charakter i wartość prądu generowanego podczas zwarcia; zamieścił uzasadnienie teoretyczne, a następnie symulacyjne potwierdzenie przydatności proponowanych metod do stosowania w układach elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej sieci współpracujących ze źródłami wiatrowymi;
- w rozdziale siódmym przedstawił wiele wniosków i uwag końcowych oraz wskazał możliwe kierunki dalszych badań.

3. Ocena znaczenia i aktualności podjętej tematyki

Problematyka podjęta przez Doktoranta związana jest ściśle z obserwowanym kierunkiem rozwoju systemu elektroenergetycznego. Zwiększający się udział źródeł generacji rozproszonej w sektorze wytwórczym - wprawdzie wymuszony, jest faktem nieodwracalnym. Tworzenie sieci typu Smart Grid powoduje jednocześnie zmianę funkcjonalności w pracy systemu elektroenergetycznego. Jak wiadomo z dostępnych technologii źródeł generacji rozproszonej najszybciej następował rozwój energetyki wiatrowej. To powodowało i będzie powodować coraz więcej problemów z zachowaniem prawidłowej pracy systemu elektroenergetycznego w związku z rosnącą liczbą źródeł wiatrowych, również z powodu braku poprawności funkcjonowania automatyki elektroenergetycznej. Dość powszechnie panuje przekonanie, że lokalne źródła wytwórcze można bezproblemowo przyłączać do systemu elektroenergetycz-

nego praktycznie bez modyfikacji konfiguracji i nastawień zainstalowanej automatyki zabezpieczeniowej, a nawet bez sprawdzenia możliwości dalszej pracy tych zabezpieczeń w zmieniających się warunkach sieciowych. Jest to podejście błędne i niebezpieczne. W wielu przypadkach istniejące struktury elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej oraz stosowane dotychczas algorytmy pomiarowe i decyzyjne nie są w stanie skutecznie i niezawodnie realizować powierzone im zadania. Niejednokrotnie obecność w strukturze sieci źródła wiatrowego (także innych lokalnych źródeł wytwórczych) nawet o niewielkiej mocy może powodować niepoprawne określenie wartości wielkości kryterialnych zabezpieczeń, prowadząc w konsekwencji do błędnej identyfikacji stanu pracy chronionego obiektu elektroenergetycznego oraz wypracowania niewłaściwej decyzji wykonawczej. Może to skutkować wydłużonym czasem eliminacji ze struktur sieci obiektu objętego zwarcie bądź nawet brakiem wymaganego zadziałania zabezpieczeń. Jest to niedopuszczalne, gdyż poprawność działania zabezpieczeń linii jest jednym z ważniejszych czynników warunkujących stabilność pracy układu sieciowego i tym samym pewność dostaw energii do odbiorców.

W Krajowym Systemie Elektroenergetycznym najczęściej stosowanymi zabezpieczeniami podstawowymi linii WN są zabezpieczenia odległościowe. Ograniczenie ich funkcjonalności jest podyktowane przede wszystkim wyznaczaniem impedancji jedynie w oparciu o dostępne lokalnie napięcia i prądy. Dlatego w wielu przypadkach w złożonych funkcjonalnie i konfiguracyjnie układach sieciowych, do których zalicza się linie elektroenergetyczne z odczepami aktywnymi, taki zbiór wielkości wejściowych może być niewystarczający do poprawnego określenia impedancji pętli zwarciowej przez algorytm pomiarowy zabezpieczenia odległościowego. Może to spowodować błędne decyzje algorytmu decyzyjnego tych zabezpieczeń i – w konsekwencji – wywołać bardzo negatywne skutki w układzie sieciowym. Należy tu wyraźnie podkreślić, że nieprawidłowości w pracy zabezpieczeń linii były przyczyną wielu rozległych awarii systemowych.

Zaproponowana przez Doktoranta Obszarowa Automatyka Zabezpieceniowa Układów Odczepowych (OAZUO) może w istotny sposób poprawić funkcjonowanie zabezpieczeń odległościowych w układach sieciowych współpracujących ze źródłami generacji rozproszonej. Podkreśla się, że OAZUO może mieć bardzo rozbudowaną funkcjonalność. W proponowanej koncepcji OAZUO może pełnić rolę i zadania m.in.: elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (w tym automatyki eliminacyjnej, prewencyjnej i restytucyjnej), automatyki dedykowanej sieciom typu Smart Grid (łącznie z funkcjami wynikającymi z urynkowienia energetyki i zapewnienia komunikacji między uczestnikami rynku energii), automatyki rezerwującej lub wspomagającej działania automatyki sterującej i zabezpieczeniowej obiektów sąsiednich do obszaru nadzorowanego, a także automatyki wspomagającej planowanie ruchu sieciowego i sterowanie systemem elektroenergetycznym na poziomie lokalnym i obszarowym. Dotychczas te zastosowania nie były planowane do wykonywania za pomocą jednego kompleksowego systemu automatyki.

Na podstawie tych stwierdzeń uważam, że temat podjęty przez Autora jest ważny i aktualny, a wyniki analiz są niezwykle istotne dla poszukiwań rozwiązań mających na celu poprawę funkcjonowania automatyki elektroenergetycznej w zmieniających się warunkach sieciowych.

Ma to również fundamentalne znaczenie dla aspektów technicznych związanych z wytwarzaniem, przesyłem i odbiorem energii elektrycznej dla ogólnie pojętego bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego.

4. Ocena merytoryczna pracy

4.1. Zastosowana metodyka badań

Praca jest bardzo rozbudowana i porusza wiele zagadnień związanych z warunkami pracy zabezpieczeń odległościowych linii w układach sieciowych złożonych funkcjonalnie i konfiguracyjnie. Badania przeprowadzone przez Autora pracy odnoszą się zarówno do algorytmu pomiarowego, jak i do algorytmów decyzyjnych wykorzystywanych w zabezpieczeniach odległościowych. W treści pracy odnaleźć można wieloaspektowe analizy związane z problematyką wyznaczania impedancji w układach linii z odczepem oraz ograniczeniach stosowanych algorytmów decyzyjnych w przypadku zafałszowania wielkości kryterialnej. Prowadzone rozważania uwzględniają niejednakowość procesu wypracowania decyzji wykonawczej w zabezpieczeniach odległościowych bezłączowych i łączowych. Dodatkowo – parametryzując „klasyczne” zabezpieczenia odległościowe – Autor wziął pod uwagę ograniczenia konstrukcyjne wprowadzane przez producentów zabezpieczeń (m.in. uzależnienie maksymalnego zasięgu rezystancyjnego stref pomiarowych od nastawionego zasięgu reaktancyjnego) oraz praktykę służb zabezpieczeniowych (m.in. maksymalne spodziewane wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia). Pozwoliło to uzyskać możliwe najdokładniejsze odwzorowanie warunków pracy zabezpieczeń odległościowych w rzeczywistych układach sieciowych.

Przyjęte przez Autora założenia wskazują, że Autor ma głęboką wiedzę w dziedzinie stanów dynamicznych wywołanych zakłóceniami w systemie elektroenergetycznym. Bardzo słusznie eliminuje z badań zagadnienia dotyczące stanów quasi-ustalonych, zaś skupia się na analizach dotyczących elektromagnetycznych stanach przejściowych i wynikających z tego wymagań dotyczących odwzorowania elementów systemu elektroenergetycznego.

Wybór narzędzi matematycznych DIgSILENT PowerFactory i MATLAB uważam za właściwy dla symulacji w zakresie przyjętym przez Autora. Jest aktualnie wiele dostępnych programów zawierających nowoczesne metody numeryczne i modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego. Program DIgSILENT PowerFactory, w odróżnieniu do pozostałych, posiada modele zabezpieczeń, co miało oczywiście dla analiz wykonanych przez Autora fundamentalne znaczenie.

Autor bardzo dobrze opisuje zamierzenia badawcze oraz bogato dokumentuje przeprowadzone symulacje. Podane w załącznikach szczegółowe dane badanych układów pozwalają na ewentualną weryfikację uzyskanych przez Niego wyników za pomocą innego dostępnego oprogramowania komputerowego np. Netomac lub EMTP.

4.2. Ocena wyników analizy

Najwartościowszym elementem wykonanej pracy jest sformułowanie nowatorskich metod wyznaczania skorygowanej impedancji niewrażliwych na obecność lokalnych źródeł wytwórczych w strukturze chronionego ciągu liniowego. Autor słusznie przyjął, że zawężenie zbioru uwzględnianych czynników fałszujących wyznaczanie impedancji jedynie do zjawiska spływu prądów zwarciovych, (jako czynnika fałszującego bezpośrednio wywołanego przyłączeniem źródła) jest niewystarczające. Dlatego uwzględnił także inne czynniki fałszujące, które mogą wystąpić w układzie sieciowym z odczepem aktywnym. Podkreśla się, że możliwe jest uwzględnienie dodatkowych czynników fałszujących, jeśli znane są skutki wpływu wystąpienia danego czynnika na postać równania określającego wektor impedancji „widziany” przez „klasyczne” zabezpieczenie odległościowe. Należy również podkreślić, że zaproponowany sposób formułowania metod wyznaczania skorygowanej impedancji jest na tyle uniwersalny, że pozwolił na ich uogólnienie dla linii n-odczepowej. Do innych głównych osiągnięć Autora można zaliczyć: przeprowadzenie pogłębionej analizy poprawności działania istniejących struktur zabezpieczeń odległościowych linii z przyłączonymi źródłami wiatrowymi oraz opracowanie koncepcji Obszarowej Automatyki Zabezpieceniowej Układów Odczepowych. Doktorant wykazuje się bardzo dobrą znajomością problematyki odnoszącej się zarówno do funkcjonowania zabezpieczeń odległościowych linii w układach sieciowych złożonych funkcjonalnie i konfiguracyjnie, jak i zachowywania się źródeł wiatrowych w stanach zakłóceniovych. W konsekwencji umożliwiło to zaproponowanie rozwiązań, które w znaczący sposób mogą poprawić detekcję i eliminację zwarć przez zabezpieczenia odległościowe ciągów liniowych z odczepowo przyłączonymi lokalnymi źródłami wytwórczymi (w tym źródłami wiatrowymi). W ten sposób Doktorant udowadnia postawioną na początku pracy tezę naukową. Przeprowadzone przez Doktoranta analizy i symulacje potwierdzają słuszność przyjętych założeń i wskazują na wysoką zasadność podjętej tematyki oraz kierunków badań. Niewątpliwie bardzo ważnym zyskiem z recenzowanej pracy jest opracowanie zasad tworzenia obszarowych systemów automatyki elektroenergetycznej, które mają charakter uniwersalny i mogą być zastosowane dla różnych obiektów elektroenergetycznych.

4.3. Uwagi dyskusyjne

W trakcie studiowania pracy nasunęły mi się następujące uwagi i pytania:

- W opracowanych metodach wyznaczania skorygowanej impedancji założono znajomość zsynchronizowanych czasowo danych wejściowych pozyskiwanych z przestrzennie rozproszonych punktów rozlokowanych w różnych miejscach nadzorowanego obszaru sieciowego. Jaki sposób realizacji zadania podstawowego proponowanej koncepcji OAZUO – funkcji automatyki zabezpieceniowej – przewiduje się, jeśli nastąpi utrata połączenia z rozproszonymi punktami pomiaru?
- Na rysunku 6.4 (str. 112) przedstawiono porównanie przebiegów czasowych wartości rezystancji i reaktancji (przeliczonych na długość) obliczonych „klasyczną” i opracowanymi metodami wyznaczania impedancji. W stanie zakłócenia zwarcio-

wego wyniki uzyskane z „opracowanych” metod rzeczywiście pokrywają się z wartościami oczekiwanymi, poprawnymi dla rozpatrywanej lokalizacji zakłócenia. Z kolei wyniki „klasycznego” algorytmu pomiarowego są obarczone zjawiskiem splotu prądów zwarciovych występującym w pętli zwarcia „widzianej” przez analizowane zabezpieczenie odległościowe. Czym natomiast są spowodowane znaczące różnice poziomów wartości składowych impedancji obliczanych przez porównywane metody w stanie przedzakłóceniovym? Czy zaobserwowana dysproporcja wartości estymat składowych impedancji wyznaczanych przez porównywane metody („klasyczną” i opracowane) w stanie przedzakłóceniovym i podczas zwarcia polepsza bądź pogarsza warunki pracy zabezpieczeń odległościowych?

- W załączniku Z1.1.1., podano krótkie informacje dotyczące modelu zewnętrznej sieci elektroenergetycznej. Autor pisze o wykorzystaniu w programie DIgSILENT PowerFactory – bloków External Grid. Proszę o krótką charakterystykę tej metody. Jak jest określana struktura schematu zastępczego – w dziedzinie czasu czy częstotliwości? Czy też stosowana jest zwyczajna redukcja elementów pasywnych i aktywnych?. Przy poszukiwaniu opisu tej metody znalazłem w opracowaniu zrealizowanym w TU Denmark sformułowanie „...The ‘External Grid’ in DIgSILENT is a simplified generator model...”. Proszę o wyjaśnienie.
- Autor wyjaśnia, że uproszczenia, które przyjął w modelu podsystemów są dopuszczalne z uwagi na spójność tej sieci. Jak należy to rozumieć w odniesieniu do badań elektromagnetycznych stanów przejściowych? Czy stosowano jakieś udoskonalenia modelu podsystemów np. przez identyfikację parametrów tej sieci?
- Często w pracy Autor informuje o bardzo licznych zbiorze wykonanych symulacji zakłóceń zwarciovych, przy czym podaje wyniki tylko dla zwarć jednofazowych i trójfazowych Czy brał również pod uwagę inne zwarcia międzyfazowe – w tym zwarcia niejednoczesne?. Jaki wpływ ma uwzględnienie lub nie, niejednoczesności występowania zakłóceń?
- Autor analizuje zwarcia metaliczne oraz przez rezystancje przejścia. Czy podczas symulacji zwarć łukowych brał pod uwagę nieliniowy charakter tej rezystancji? W jaki sposób odwzorowywał to zjawisko i czy miało ona wpływ na wyniki analiz?
- Czy podczas analizy stanów przejściowych uwzględniono czynniki uwzględniające dynamikę atmosfery? Czy rozważano wpływ modelu matematycznego wiatru uwzględniający zjawiska tarcia powietrza o powierzchnię gruntu oraz spiętrzenie (cień) powietrza przed (za) wieżą elektrowni pozwalającego na symulację pracy elektrowni wiatrowej podczas normalnych jak i ekstremalnych warunków wiatrowych? Proszę o porównanie możliwości dostępnych odwzorowań turbiny wiatrowej w programach DIgSILENT PowerFactory oraz Netomac w zakresie analizy wpływu takich faktów jak zmienność prędkości wiatru, kąt położenia łopat w modelu turbiny itp, na dokładność uzyskanych wyników.

4.4. Uwagi redakcyjne

Zadaniem recenzenta jest ocena pracy, przede wszystkim z punktu widzenia wydania opinii, że analiza podjęta przez Autora stanowi oryginalne rozwiązanie określonego zagadnienia naukowego. Podtrzymując w pełni wagę zagadnienia oraz słuszność podjęcia tego tematu, co stwierdzono powyżej, należy jednocześnie stwierdzić, że lektura pracy była ułatwiona dla czytelnika dzięki bardzo starannej edycji pracy, również jej załączników. Praca jest bardzo obszerna i w niektórych miejscach odnosi się wrażenie, że Autor w końcowym etapie redagowania pracy chciał dokonać skrótów, przez co niektóre nieliczne fragmenty mogą wydawać się nie w pełni wyjaśnione szczególnie dotyczy to załączników gdzie Autor podaje informacje dotyczące modelu farmy wiatrowej.

5. Wniosek końcowy

Doktorant rozwiązał poprawnie postawiony problem. Użył w tym celu właściwych i nowoczesnych metod naukowych i udowodnił postawioną przez siebie tezę. Sposób przeprowadzonych badań wskazuje, że mgr inż. Mateusz Szablicki posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 roku. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Szablicki'.