



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Kuczka

pt. Vacuum circuit breaker switching in medium voltage networks with photovoltaic panels.

1. Tematyka i tezy rozprawy

Rozprawa dotyczy problematyki przebiegów łączeniowych w sieciach elektroenergetycznych, badanej intensywnie od dawna. O aktualności i potencjale badawczym tematyki rozprawy decydują jednak:

- dynamiczny rozwój w ostatnich latach elektroenergetyki fotowoltaicznej w wielu krajach na świecie,
- dotychczasowy brak kompleksowych badań przebiegów generowanych przez łączniki próżniowe w sieciach średnich napięć zasilanych z elektrowni fotowoltaicznych.

Zdaniem wielu specjalistów, coraz groźniejsze dla naszej cywilizacji zmiany klimatyczne nie pozostawiają nam wyboru: mimo wysokich kosztów i licznych problemów nie ma alternatywy dla odnawialnych źródeł energii elektrycznej. Wykorzystanie gigantycznej energii Słońca ma szczególne perspektywy. Wykazuje to dynamiczny rozwój elektroenergetyki fotowoltaicznej w wielu krajach. Duże wrażenie wywołują liczby opisujące rozwój i obecny stan elektroenergetyki fotowoltaicznej na świecie. Dla przykładu wymieniam: moc 25 GW paneli solarnych pracujących w niemieckich sieciach elektroenergetycznych (wg danych ten rekord został osiągnięty 17 kwietnia br.); moce szczytowe 550 MW największych na świecie elektrowni fotowoltaicznych uruchomionych w 2014 i 2015 roku w USA (*Topaz Solar Farm* i *Desert Sunlight Solar Farm*).

W stacjach transformatorowych łączących elektrownie fotowoltaiczne z sieciami średnich napięć instalowane są nowoczesne wyłączniki próżniowe. Posiadają one liczne zalety, mianowicie:

- krótki czas łukowy, ograniczony na ogół do pierwszego przejścia prądu przez wartość zerową,
- stosunkowo niedużą erozję materiału stykowego, bezpośrednio związaną z krótkim czasem łukowym i niewielką energią łuku,
- dużą szybkość odzyskiwania wytrzymałości elektrycznej przerwy łukowej,
- całkowitą separację łuku elektrycznego i produktów jego palenia się od otoczenia,
- prostą, od strony mechanicznej, konstrukcję komór gaszeniowych,
- wyraźnie większą trwałość łączeniową w porównaniu do wyłączników innych rodzajów.

Wadą wyłączników próżniowych jest natomiast generacja szybkozmiennych przepięć łączeniowych, w wyniku nagłego przerwania prądu przed jego naturalnym przejściem przez zero (zjawisko nazywane ucięciem prądu) oraz powtórnych zapłonów łuku. Te zjawiska są dla opiniowanej pracy podstawowe.

W tych aspektach tematykę rozprawy oceniam bardzo pozytywnie.

Przedstawiona w rozprawie teza pracy doktorskiej jest następująca:

Istnieje możliwość określenia warunków eksploatacyjnych oraz topologii elektrowni fotowoltaicznych przyłączonych do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej, w których operacje łączeniowe dokonywane wyłącznikiem próżniowym w rozdzielni średniego napięcia mogą doprowadzić do generacji ponownych zapłonów łuku oraz wysokich wartości przepięć. Uwzględnienie aparatury zainstalowanej po stronie niskiego napięcia transformatora sprzęgającego z siecią dystrybucyjną jest istotne z punktu widzenia poprawnej analizy przepięciowej.

Jest to teza oryginalna, stawiająca wysokie wymagania badawcze.

2. Charakterystyka rozprawy i oceny częściowe

Rozprawa składa się z 165. stron, podzielonych na 7 rozdziałów oraz wykaz cytowanej literatury.

Rozdział wstępny przedstawiając genezę tematu, tezę pracy doktorskiej oraz *strukturę* rozprawy, stanowi właściwe, dobrze opracowane wprowadzenie.

Rozdziały 2 – 4 zawierają obszerną wiedzę związaną z tematyką rozprawy. Podkreślam właściwy dobór zagadnień i informacji oraz umiejętne – merytorycznie uzasadnione – ich *wyważenie* w aspekcie ograniczonej objętości rozprawy. W to *dojrzałe* studium literaturowe znacząco wpisują się własne osiągnięcia badawcze Doktoranta dotyczące możliwych scenariuszy przepięciowych w elektrowniach fotowoltaicznych zasilających sieci średnich napięć.

Badania przebiegów w sieciach i układach elektroenergetycznych mogą być realizowane metodami:

- bezpośrednich rejestracji i pomiarów w obiektach elektroenergetycznych,
- analiz teoretycznych,
- symulacji komputerowych,
- symulacji laboratoryjnych.

Dwie pierwsze metody niestety mają różne ograniczenia i często są bardzo trudne do zastosowania. Nowoczesną – coraz doskonalszą – metodą są symulacje komputerowe. Dla ich weryfikacji, a także dla uzyskania niezbędnych danych, celowe są symulacje i pomiary laboratoryjne.

Stanowisko laboratoryjne i wyniki pomiarów symulacyjnych przedstawia rozdział 5. Rozdział 6 opisuje procedury symulacji komputerowych i pokazuje wyniki tych badań. Oceniając wysoko tę zasadniczą część pracy zwracam uwagę na:

- oryginalność laboratoryjnego stanowiska badawczego,
- wykorzystanie w porównawczych symulacjach komputerowych dwóch specjalistycznych programów – EMTP-ATP (*Electromagnetic Transients Program – Alternative Transients Program*) i PSCAD (*Power System Computer Aided Design*),
- kompleksowość symulacji laboratoryjnych i komputerowych,
- dużą zgodność wyników tych symulacji.

Uzyskane wyniki są interesujące, zarówno w aspektach poznawczych jak i praktycznych. Szczególne osiągnięcie badawcze – w mojej ocenie – stanowi stwierdzenie i fizyczne zinterpretowanie silnego wpływu filtrów L – C przekształtników elektroenergetycznych na przebiegi generowane w procesach łączeniowych transformatorów, różnego podczas włączania i wyłączania transformatorów i zależnego od pojemności elektrycznej filtrów.

Rozdział 7 zawiera podsumowujące analizy, zestawienia i wnioski dotyczące badanych w pracy doktorskiej problemów: przebiegów generowanych przez wyłączniki próżniowe zainstalowane w stacjach transformatorowych łączących elektrownie fotowoltaiczne z sieciami rozdzielczymi średnich napięć oraz ograniczania tych przebiegów metodami biernymi i aktywnymi. Zwracają uwagę dyskusje odnoszące wykonane badania i osiągnięte wyniki do tezy badawczej. Rozdział ten, i całą rozprawę, kończy przedstawienie kierunku dalszych badań. Uważam, że tak zredagowany rozdział końcowy bardzo dobrze podsumowuje rozprawę.

Wykaz bibliograficzny obejmuje 144 pozycje literaturowe, w zdecydowanej większości źródłowe. Świadczy on o szerokich studiach literaturowych Doktoranta.

Do usterek należą jedynie: brak stron artykułów w czasopismach, złe uszeregowanie kilku pozycji literaturowych ([63], [114], [115], [127]), brak nazwiska współautora monografii [42].

Pozytywnie wyróżniam stronę redakcyjną rozprawy. Posiada ona logiczny układ rozdziałów i zachowuje właściwe proporcje co do ich objętości. Materiał ilustracyjny – w postaci licznych rysunków i tabel – jest dobrze dobrany i starannie opracowany. Użyta w rozprawie terminologia jest zgodna z międzynarodowymi normami i nieformalnymi ustaleniami w technicznym języku angielskim. Stosowane w rozprawie jednostki należą do systemu SI. Studiowanie rozprawy ułatwia wykaz symboli, oznaczeń i skrótów. W monografii występują tylko bardzo nieliczne błędy redakcyjne. Zaliczam do nich brak pełnej zgodności przebiegów na rysunkach 5.11a i 5.11b oraz 5.12a i 5.12b.

3. Uwagi i pytania

1. W opisie laboratoryjnego stanowiska badawczego brak jest parametrów trójfazowego autotransformatora regulującego napięcie transformatora 250 kVA. Na podstawie zdjęcia stanowiska, zamieszczonego na rys. 5.4, sędzę, że jest to autotransformator składający się z trzech autotransformatorów laboratoryjnych stosunkowo niewielkiej mocy. Z tą uwagą wiąże się pytanie dotyczące przyczyn wyższego napięcia jednej z faz transformatora 250 kVA – rys. 5.8a i wyrażnie różnych zniekształceń napięć fazowych w przypadku przyłączenia transformatora 20 kVA – rys. 5.8b.
2. Rozdział 5 powinien zawierać więcej informacji metrologicznych. Przypuszczam, że napięcia i prądy mierzono za pomocą sond. Jeśli tak, to o jakich parametrach metrologicznych?
3. Badania wykonano dla napięć międzyfazowych 0,4 kV/6 kV, a więc dla wartości maksymalnej napięć fazowych $\frac{6 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ kV. Dlaczego stosowano ograniczniki przepięć o znacznie wyższych napięciach znamionowych i napięciach ciągłej pracy?
4. Celowe – moim zdaniem – byłoby wykonanie badań przepięć również w układach bez ograniczników przepięć. Posiadanie takich danych jest w badaniach skuteczności ochrony przepięciowej podstawowe.
5. Odczuwam brak informacji dotyczących opracowania wyników badań laboratoryjnych przepięć pokazanych na wykresach *slupkowych* na licznych rysunkach w rozdziale 5. Jakie przedstawiają wartości – średnie czy maksymalne? Jakie były rozrzuty mierzonych wielkości?

6. Przebiegi symulacyjne pokazane na rys. 6.9, 6.10 i 6.11 dotyczą procesu włączenia, a nie wyłączenia jak błędnie informują podpisy pod tymi rysunkami.
7. Program komputerowy EMTP-ATP jest często wykorzystywany przez specjalistów do symulacji przebiegów w sieciach elektroenergetycznych. Doktorant jest jednym z niewielu w kraju specjalistów mających duże doświadczenie w symulacjach przebiegów w sieciach elektroenergetycznych również z wykorzystaniem programu PSCAD. Proszę o syntetyczne porównanie możliwości, ograniczeń i trudności w stosowaniu tych programów w badaniach przebiegów.
8. Aktywne metody ograniczania przebiegów w sieciach elektroenergetycznych są perspektywiczne. Proponowana metoda blokowania tranzystorów falowników po wystąpieniu pierwszego ponownego zapłonu łuku podczas wyłączania transformatora wyłącznikiem próżniowym (z odpowiednio krótkim opóźnieniem) jest interesująca. Czy proponowana metoda jest jeszcze tylko w stadium koncepcji autorskiej?
9. Wskazany w zakończeniu rozprawy kierunek dalszych badań stanowi właściwe rozwinięcie pracy doktorskiej. Proszę o sformułowanie wstępnej tezy badawczej.

4. Ocena końcowa rozprawy i wnioski

Rozprawę oceniam bardzo wysoko. Na taką ocenę końcową składają się bardzo pozytywne oceny częściowe, przedstawione w punktach 1 i 2 niniejszej recenzji.

Uważam, że rozprawa wnosi oryginalny wkład naukowy w problematykę przebiegów w sieciach elektroenergetycznych. Realizując pracę doktorską Doktorant wykazał się dużą wiedzą z zakresu elektrotechniki oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Jestem w pełni przekonany, że rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w obowiązującej ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnioskuje zatem o dopuszczenie Autora rozprawy – mgr. inż. Tomasza Kuczka – do publicznej obrony wykonanej pracy doktorskiej.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy badań, ich oryginalność i kompleksowość oraz bardzo dobrą redakcję rozprawy uważam, że rozprawa zasługuje na wyróżnienie. Z formalnym wnioskiem w tej sprawie wystąpię na posiedzeniu Komisji ds. przewodu doktorskiego, w niejawniej części publicznej dyskusji nad rozprawą doktorską na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie.

