



prof. dr hab. inż. Zbigniew HANZELKA
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30
tel.: (12) 617 28 78, fax: (12) 633 22 84, e-mail: hanzel@agh.edu.pl



Kraków, 7 września 2015 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

wykonana na zlecenie prof. dr hab. inż. Antoniego Cieśli, Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH.

Autor: mgr inż. Tomasz Kuczek

Tytuł: **Vacuum circuit breaker switching in medium voltage networks with photovoltaic panels**
Operacje łączeniowe wyłączników próżniowych w sieciach średniego napięcia z uwzględnieniem paneli fotowoltaicznych

1. Dane bibliograficzne rozprawy

Rozprawa, opracowana w języku angielskim, zawiera 165 stron. Składa się z siedmiu rozdziałów, spisu literatury oraz wykazu stosowanych w tekście symboli i skrótów.

2. Ogólny pogląd na treść rozprawy oraz jej wartość naukową

Praca dotyczy ważnego zagadnienia współczesnej inżynierii elektrycznej, jakim jest poprawne działanie urządzeń – w rozważanym przypadku układów sprzęgających fotowoltaiczne źródła energii z siecią zasilającą - w obecności zaburzeń elektromagnetycznych wywołanych pracą wyłączników próżniowych.

Badane były procesy łączeniowe wywołane pracą wyłącznika próżniowego SN (lecz nie tylko) w obecności elektrowni PV przyłączonej do strony niskiego napięcia transformatora SN/nN i wyposażonej w wejściowe filtry LC. Taka topologia obwodu kształtuje charakterystyki częstotliwościowe impedancji systemu widzianej z zacisków wyłącznika w sposób sprzyjający oscylacjom napięcia o dużych wartościach szczytowych i dużych pochodnych zmian. Szczególną uwagę poświęcono generacji wielokrotnych przeskoków łukowych pomiędzy stykami wyłącznika próżniowego zarówno w stanach załączania jak i wyłączania obwodu.

Problematyka przepięć jest obecna od wielu lat w światowej i polskiej literaturze technicznej. Trudnym zadaniem jest więc wytworzenie wartości dodanej do istniejącego stanu wiedzy. W ocenianej pracy nowym elementem jest obecność elektrowni PV, jako czynnika mającego wpływ na charakter zachodzących zjawisk.

3. Charakterystyka rozprawy

Omówienie pracy w pierwszej części recenzji ograniczono do podkreślenia zalet i wad oraz zwrócenia uwagi na te zagadnienia ogólne, które w opinii recenzenta mają charakter dyskusyjny. W drugiej części recenzji zawarto wybrane uwagi szczegółowe

Uwagi krytyczne

1. Teza postawiona w rozdziale pierwszym (str. 13) jest dyskusyjna. To, że „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.....” nie budzi, zdaniem recenzenta, większych wątpliwości. Przedmiotem rozważań może być sposób analizowania tego problemu, zastosowane metody badawcze, nakład pracy itp. Warto było poprzestać na opisanu obszaru badań i/lub opisanu zagadnienia technicznego, które wymaga rozwiązania.
2. Praca zawiera pewne elementy wiedzy powszechnej, książkowej, z których bez szkody dla rozumienia całości tekstu można zrezygnować. Są one jedynie dowodem erudycji Autora, nie mają natomiast wpływu na istotne elementy pracy. We wstępie w rozdziale pt. *Literature research – state of art* Autor sięgnął do początków rozważanej dziedziny, przywołując prace Kelvina, Heaviside, Fortescue, prezentując historię analizy procesów łączeniowych, historię modelowania i tworzenia pakietów symulacyjnych, historię badań przebiegów oscylacyjnych wywołanych operacjami łączeniowymi ze szczególnym uwzględnieniem procesów w wyłącznikach próżniowych. Niepotrzebnie. Dotyczy to także rozdziałów 3 i 4. W pierwszej części tego ostatniego zawarto wiele książkowych informacji, z których bez szkody dla całości pracy można było zrezygnować. W przypadku pracy doktorskiej, trafiającej z reguły do wybranego zainteresowanego tematyką kręgu odbiorców należy, zdaniem recenzenta, założyć pewien poziom wiedzy czytelnika.
3. Autor obiecuje czytelnikowi porównanie dwóch środowisk symulacyjnych PSCAD i EMTP-ATP, ze szczególnym uwzględnieniem różnic w technice modelowania zjawisk wysokoczęstotliwościowych w kablach, transformatorach i wyłącznikach próżniowych. Dlaczego wybrano dwa środowiska symulacyjne, które w zasadzie oferują takie same możliwości modelowania? W czym one się uzupełniają? Co wynika z przedstawienia tych samych przebiegów w różnych środowiskach programistycznych? Jedyne wskazany w pracy element różniący środowiska, to sposób odtworzenia charakterystyki magnesowania. Czytając pracę nie do końca dostrzegam wartość wynikającą z badań prowadzonych równocześnie w dwóch środowiskach symulacyjnych.
4. Źle opracowano rozdziały 4.3 i 4.4. Przedstawiono w nich podstawowe informacje z dziedziny energoelektroniki zaczerpnięte z dwóch elementarnych pozycji książkowych. Tekst budzi wiele wątpliwości, a informacje tu zawarte są podstawowe i nie wnoszą nic do całości pracy. Modele przekształtników są bardzo proste, nie wyposażono je w układy regulacji, przyjęto arbitralnie jeden punkt pracy przekształtnika, bez uzasadnienia. Tak zaprezentowane modele przekształtników nie wnoszą nic do głównego nurtu badań. Nie są wykorzystywane w dalszej części rozprawy, gdzie praktycznie jedyną reprezentacją przekształtnika jest jego filtr wejściowy. Ten filtr może przedstawiać wiele różnych

urządzeń energoelektronicznych, niekoniecznie instalację PV. Powstają pytania: (a) czy to jest zgodne z intencją wyrażoną tytułem pracy i (b) czy rodzaj przekształtnika i sposób jego sterowania nie ma wpływu na charakter przebiegu? W opinii recenzenta praca dotyczy pewnej klasy układów energoelektronicznych z wejściowymi filtrami LC, niekoniecznie tylko instalacji PV.

5. Czy badania instalacji o mocy transformatora 250 kVA i 20 kVA mogą być uogólnione na instalacje większej mocy? Dodatkowo pierwszy transformator nie pracuje w znamionowych warunkach – 6 kV w miejsce znamionowych 15 kV. Prąd biegu jałowego transformatora 250 kVA - 20 mA, ale transformatora 20 kVA – ponad 80 mA. Dobór mocy transformatorów sprawia wrażenie przypadkowości.

Zalety pracy

1. Praca jest przykładem zastosowania poprawnej metody badawczej rozumianej, jako ogół czynności i sposobów niezbędnych do rozwiązywania problemu naukowego. W tym łańcuchu działań zawarto: (1) przedstawienie problematyki i szczegółowo tematu rozprawy, (2) prezentację stanu wiedzy (zbyt obszernie), (3) rozważania teoretyczne, (4) badania symulacyjne, (5) badania laboratoryjne, (6) podsumowanie i wnioski końcowe. Szczególnym walorem pracy jest część eksperymentalna zrealizowana w warunkach laboratoryjnych.
2. Autor udowadnia bardzo dobre rozpoznanie literatury przedmiotu rozważań. W bibliografii wyszczególniono liczne i aktualne prace, w tym także liczne prace Autora. Wiele elementów rozprawy zostało zweryfikowanych pozytywnymi recenzjami publikacji współautorstwa Doktoranta.
3. Znaczącą wartością są praktyczne wnioski wynikające z przeprowadzonych badań w zakresie stosowania środków ochrony przepięciowej. Przeprowadzono analizę techniczną i ekonomiczną wad i zalet różnych sposobów. Przebadano wpływ filtrów wejściowych LC interfejsów energoelektronicznych na parametry przebiegów. Stwierdzono ich korzystny wpływ podczas odłączania obwodu i niekorzystny podczas załączania obwodu po stronie SN. Autor wyjaśnił ten fakt pobudzeniem rezonansowym w obwodzie: indukcyjność transformatora i pojemność filtra. Czy wobec tego niekorzystny wpływ kondensatora filtra podczas załączania zmieni się, jeżeli zmieniona zostanie wartość pojemności i tym samym wartość częstotliwości rezonansowej załączanego obwodu?
4. Wykazano możliwość laboratoryjnego i symulacyjnego badania warunków pracy instalacji PV podczas przebiegów powodowanych operacjami łączeniowymi wyłącznika próżniowego. Przebadano różne scenariusze ich generacji. Poprawność modeli symulacyjnych została potwierdzona analizą porównawczą przebiegów uzyskanych w laboratorium i na drodze symulacyjnej. Poprzez badania symulacyjne z wykorzystaniem opracowanych modeli przeprowadzono analizę przypadków, które nie mogły być badane w laboratorium, ze względu na istniejące ograniczenia techniczne.

Bardzo proszę o skomentowanie podczas obronny wyszczególnionych powyżej uwag oraz o odpowiedzi na pytania szczegółowe zaznaczone w tekście podkreśleniem.

6. Ocena ogólna i wniosek końcowy

Poczynione uwagi ogólne i szczegółowe (w wielu przypadkach dyskusyjne) nie zmieniają pozytywnej opinii na temat recenzowanej pracy. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Kuczka stanowi poprawne opracowanie ciekawego i aktualnego zagadnienia naukowo-technicznego i dowodzi zadawalającego opanowania przez Doktoranta dyscyplin naukowych, z którymi jest związana.

Przedłożona rozprawa spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. U. nr 65) oraz rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim i habilitacyjnym. Wnioskuje o przystąpienie do kolejnych przewidzianych w w/w Ustawie etapów procedury.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hame', with a long horizontal flourish extending to the right.

ZAŁĄCZNIK nr 1: Uwagi szczegółowe (wybrane)

1. Preface

Str. 8, pierwszy akapit – instalacje PV są „... totally pollution free” jest stwierdzeniem zasadniczo nieprawdziwym.

2. Transients in power systems

Str. 16, rys. 2.2. – nieczytelne objaśnienie. Jak był obciążony transformator?

Str. 20 – rozważania prowadzone w scenariuszu drugim – załączenie i wyłączenie nieobciążonego transformatora – to problem znany i rozpoznany, niemający wiele wspólnego z instalacją PV

Str. 22, rys. 2.9 – podano wymagania niemieckie, a jak przedstawiają się wymagania dotyczące wyłączenia źródeł fotowoltaicznych w warunkach polskich?

3. Photovoltaic power plants – background information and modelling techniques

Str. 39, rys. 4.5 i kilka analogicznych rysunków – brak zbiornika energii w obwodzie DC. Drugi akapit – jakie filtry LCL ma Autor na myśli w odniesieniu do przekształtnika DC/DC?

Str. 45, tabela 4.2 – voltage at MPP [V]

Str. 48, rys. 4.14 – charakterystyka V_L ?

W modelowaniu przyjęto stałą częstotliwość łączenia, czyli brak układu stabilizującego napięcie na wyjściu.

Str. 50, rys. 4.20, przedstawia coś innego niż powinno być zgodnie z opisem.

BRK na rys. 4.21, bez wyjaśnienia symbolu

Str. 52, rys. 4.24 – rozumiem, że symbol PV oznacza ogniwa PV wraz z przekształtnikiem DC/DC?

Rys. 4.26a i 4.27a (brak przywołania źródła rysunków). Jeżeli za punkt o potencjale odniesienia przyjęto punkt pomiędzy kondensatorami (a tak wynika z akapitu pod rysunkiem 4.26), to napięcie V_0 prezentowane na rys. 4.27a powinno zmieniać znak. Podobnie relacja pomiędzy rysunkiem 4.26b i rys. 4.27b.

Przywołując dwie pozycje książkowe, jako podstawę rozważań energoelektronicznych warto było to zrobić lepiej.

Str. 55, rys. 4.29 pulsy łączeniowe, którego łącznika półprzewodnikowego, połączanego z szyną dodatnią czy ujemną napięcia DC?

Niezdefiniowane symbole w zależności 4.14

Str. 59, Czy rezystancje i indukcyjności modelu zależą od częstotliwości?

5. Laboratory test stand setup and measurement results

Str. 74, Rys. 5.1, lecz nie tylko – brak konsekwencji w zapisie symboli wielkości fizycznych, kursywa czy prosto, małe czy duże litery dla oznaczenia przebiegu czasowego itp.

Str. 75, rys. 5.3 – jaka jest rola filtru LC (1)? Instalacja PV jest reprezentowana wyłącznie przez filtr LC (2). Na rysunku podano na wyjściu autotransformatora napięcie 0,4 kV, podczas, gdy z tekstu pracy wynika, że było ono obniżone do 100 V.
Jak uzyskano wartości pojemności zwojowych transformatora?

Str. 76, pierwszy akapit, co oznacza stwierdzenie, że w stanie ustalonym prąd fazowy był znacząco mniejszy od akceptowalnego poziomu?

Str. 79, Autor wybrał arbitralnie dwa filtry LC różniące się wartością pojemności. Co było podstawą takiego wyboru?

Str. 80, rys. 5.8, Zaskakująco duża asymetria napięcia i jego odkształcenie.

Str. 81, akapit nad rysunkiem, ograniczenia sieciowe nie wykluczały przyłączenia paneli PV o ograniczonej mocy, kilka kW było możliwe (do około 30 A). W warunkach braku paneli filtr LC może reprezentować każdy odbiór energoelektroniczny.

Na rys. 5.10 nie uwzględniono parametrów 85 m kabla po stronie MV.

Str. 82, w przedstawionych scenariuszach badań zaprezentowano wpływ wartości pojemności, nie ma badania wpływu indukcyjności.

Str. 87, rys. 5.21, rysunek jest trochę mylący. Tym razem jest to praca elektrowni PV na wydzieloną sieć, z obciążeniem praktycznie indukcyjnym. Symulowanie tego stanu przez rzeczywistą sieć z autotransformatorem, to coś innego niż zasilanie z przekształtnika. Iloraz SCR jest tu znacząco większy niż w przypadku zasilania przekształtnikowego (rys. 5.22 i dalsze).

Str. 88, pierwszy akapit – stwierdzenie “under no load conditions” nie do końca prawdziwe, obciążeniem jest transformator bez filtru LC na stronie wtórnej.

Arbitralny dobór parametrów filtru LC na stronie nN transformatora 250 kVA.

Na ile próby przeprowadzone w tej konfiguracji mogą być uogólnione. To tylko badanie jednej konkretnej topologii z przypadkowo dobranymi wartościami elementów składowych.

Str. 91, zarejestrowane przebiegi po zmianie miejsca zainstalowania 85 m kabla – charakter zmiany przebiegu napięcia w stosunku do wcześniej przeprowadzonych pomiarów (inna lokalizacja kabla) jest raczej oczywisty.

6. Simulation results

Str. 111, ostatnie zdanie w akapicie nad rysunkiem – „Satisfying convergence of laboratory measurements and simulation results is visible”. Mało precyzyjne stwierdzenie, jakie kryterium zgodności – miara liczbowa - zostało przyjęte? Mam wrażenie, że zbieżność jest bardziej jakościowa niż ilościowa. Badania modelowe przy dużej niepewności, co do wartości parametrów zastępczych np. transformatora cechuje duża niepewność. Zbieżność wyników badań laboratoryjnych i symulacyjnych oceniana w oparciu o kryterium wizualnego podobieństwa nie zwiększa tej wiarygodności. Podobnie str. 127, akapit nad rysunkiem, kolejna teza budząca wątpliwość: Similarity to measured waveforms is visible.

Str. 123, ostatni akapit - porównanie przebiegów z rys. 5.9b i 6.19b nie wskazuje na ich znaczące podobieństwo, mimo odtworzenia – jak deklaruje Autor – wyznaczonego pomiarowo składu widma prądu.

Str. 128, przedostatni akapit. Przyjęto arbitralnie czas wyłączenia 400 ms. Czy ten czas ma wpływ na przebieg przebiecia? Z pewnością tak, to czy nie warto to głębiej analizować?

Przedstawione badania wpływu elektrowni PV na stany przejściowe podczas wyłączenia obwodu mogą budzić wątpliwości. Nie uwzględniono wpływu zmian w sterowaniu przekształtnika na zachodzące zjawiska. Tak naprawdę przekształtnik nie jest modelowany, założone jest źródło mocy o wartości 20 i 10 kW. Cemu więc mają służyć obliczenia stringów PV?

Str. 132, pierwszy akapit – "It has been assumed that the power electronic circuit has negligible impact in the particular types of studies, since the impedances of the PE switches are very low." Taką tezę trzeba udowodnić modelując w pełni przekształtnik z jego układem sterowania. W przeciwnym przypadku będzie tak jak w rozdziale 4, zostanie przyjęte, że istotne jest tylko źródło napięcia o stałej wartości i filtr LC. PV jest symulowane, jako źródło napięcia z szeregowym rezystorem.

Rozdział 6.6.4 – Autor przedstawił jedynie przebiegi przy przypadkowym stanie trójfazowego zwarcia i wyłączeniu obwodu 40 ms później. Nie wykorzystał całego rozległego obszaru badań wpływu czas rozłączenia obwodu względem chwili zwarcia na wartość generowanych przebiegów. Nie badał także innych rodzajów zwarć. Szkoda. Ta sytuacja ma niewiele wspólnego z instalacją PV, to ogólny i powszechnie występujący przypadek w wielu rodzajach instalacji.

Str. 141, czy ograniczniki lub układ RC były instalowane po obydwu stronach transformatora, nN i SN?

Str. 143, metoda blokowania tranzystorów przekształtnika przed wyłączeniem transformatora jest oczywista i stosowana w układach energoelektronicznych np. w technice napędowej, (lecz nie tylko). Stosunkowo łatwo ją zastosować w przypadku planowanych łączeń, lecz znacznie ważniejsze są te nieplanowane.