

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Karola Nowaka

pt. „Eliminowanie łuku awaryjnego i ograniczanie skutków zwarciovych z wykorzystaniem łączników hybrydowych”

1. Podstawa formalna przygotowania recenzji

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynierii, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 20.09. 2022r., przekazanej pismem WISIE.63.64.2022 Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego - Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej, z dnia 22.09.2022r.

2. Tematyka rozprawy

Procesom łączeniowym, związanym z łączeniem prądów roboczych i przetężeniowych w obwodach prądu stałego i przemiennego, towarzyszą wyładowania łukowe. Wyładowania takie mają miejsce w specjalnie skonstruowanych do gaszenia łuku elektrycznego łącznikach elektroenergetycznych, ograniczających w mniejszym lub większym stopniu skutki cieplne i dynamiczne przepływu prądów w torach prądowych zabezpieczonych nimi obwodach.

Wyładowania łukowe powstać mogą także wskutek: naturalnego starzenia i uszkodzenia izolacji torów prądowych bądź łączników, przepięć, błędnych operacji łączeniowych, nie wykonywania wymaganych przeglądów i konserwacji, złego stanu połączeń stykowych, zdarzeń losowych (np. wskutek działania sił wiatru, podczas prac budowlanych...) oraz coraz powszechniejszego wykonywania prac w sieci elektroenergetycznej pod napięciem. Powstałe w wymienionych przypadkach wyładowania łukowe związane są ze stanami awaryjnymi, a płynące wówczas prądy mogą osiągać znaczne wartości, do zwarciovych włącznie.

W sieciach nN i SN, w zdecydowanej większości przypadków, łuk awaryjny związany jest ze zwarcievem jednofazowym, które może mieć charakter eskalacyjny, przekształcając się kolejno w zwarciev dwu lub trójfazowe. Niezależnie od rodzaju zwarciev, płynący w elementach toru prądowego prąd, wielokrotnie przekraczający prąd roboczy, powoduje silne ich nagrzanie oraz powstawanie znacznych sił elektrodynamicznych, mogących zniszczyć konstrukcje wsporcze urządzeń rozdzielczych. Powstały łuk awaryjny, charakteryzujący się

bardzo wysoką temperaturą i wysokim ciśnieniem rozprzestrzeniającej się plazmy, jest także źródłem: emisji światła, fali dźwiękowej, gorących cząstek i stopionych odłamków metalu, gwałtownego wzrostu ciśnienia w środowisku i przestrzeni w której pali się oraz zagrożenia pożarowego i porażeniowego.

Z wymienionych powodów, łuk awaryjny generujący przepływ prądu zwarciovego stanowi poważne zagrożenie nie tylko dla urządzeń rozdzielczych, ale również otoczenia, zdrowia i życia ludzkiego.

W celu ograniczenia skutków łuku awaryjnego oraz przepływu prądu zwarciovego, firmy produkujące urządzenia rozdzielcze stosują różnego rodzaju środki zabezpieczające. Mogą to być rozwiązania mechaniczne (typu: kłapa bezpieczeństwa, membrana) reagujące na wzrost ciśnienia w przestrzeni objętej wyładowaniem łukowym (np. w rozdzielnicach), jak też zabezpieczenia wykorzystujące technikę cyfrową do wykrywania stanów zakłóceń i wyzwalania zabezpieczeń przetężeniowych. Są to różnego rodzaju detektory, wykrywające błysk światła łuku awaryjnego i, lub, gwałtowny wzrost ciśnienia w przestrzeni nim objętej, wymuszające bezzwłoczne zadziałanie zabezpieczenia przetężeniowego lub tzw. eliminatora, tj. układu bocznikującego, zawierającego miejsce zwarcia. Taki sposób detekcji i eliminowania łuku awaryjnego zmniejsza tylko skutki cieplne przepływu prądu zwarciovego, a nie ogranicza sił elektrodynamicznych oraz zjawisk fizycznych towarzyszących łukowi awaryjnemu.

Dla likwidacji tego typu wyładowania łukowego, korzystnym rozwiązaniem byłby ultraszybki łącznik, który poprzez znaczne skrócenie czasu palenia się łuku ograniczałby nie tylko skutki cieplne i elektrodynamiczne przepływu prądu zwarciovego, ale także eliminował powstały łuk elektryczny.

Skonstruowanie takiego łącznika stało się celem oraz przedmiotem badań wykonanych przez Doktoranta. Opracowując taki łącznik, Doktorant spodziewał się uzyskać:

- znaczne skrócenie czasu łukowego i bardzo szybkie eliminowanie łuku awaryjnego,
- ograniczenie skutków cieplnych oraz elektrodynamicznych przepływu prądu zwarciovego w zabezpieczanym obwodzie,
- ograniczenie erozji torów prądowych poddanych działaniu łuku awaryjnemu,
- ograniczenie zagrożeń spowodowanych oddziaływaniem łuku awaryjnego, takich jak: wzrost ciśnienia gazów wewnątrz zamkniętych obudów urządzeń elektrycznych, efektu akustycznego, zmniejszenie niebezpiecznej strefy rażenia łukiem oraz pożarem.

Dla realizacji postawionych celów, Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy:

„przy aktualnym stanie wiedzy, istnieją techniczne możliwości opracowania konstrukcji łącznika hybrydowego, pozwalającego na szybkie i skuteczne eliminowanie awaryjnego

łuku elektrycznego oraz efektywne ograniczanie skutków powodowanych wyładowaniami łukowymi i przepływami prądów zwarciovych”.

Postawiona teza jest bardzo odważna. Świadczy nie tylko o doskonałym przygotowaniu teoretycznym Doktoranta, ale również praktycznym, związanym ze znajomością zagadnień dotyczących: energoelektroniki, teorii sterowania, czujników przetwarzania sygnałów (np. detekcji światła, ciśnienia), metrologii elektrycznej oraz budowania różnorodnych stanowisk badawczych umożliwiających przeprowadzenie szerokich badań podanego w tezie łącznika.

Bazując na bogatej wiedzy z zakresu znajomości zjawisk w obszarze elektroenergetyki, szerokich studiach literaturowych, analizach oraz dużym doświadczeniu praktycznym, dla uzyskania postawionych celów i weryfikacji tezy rozprawy, Doktorant opracował pracujący w układzie bocznikującym miejsce dotknięte awarią autorski łącznik hybrydowy, stanowiący połączenie wielu elementów półprzewodnikowych i łącznika mechanizmowego (zwiernika).

3. Charakterystyka i zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy łącznie 115 stron i zawiera, w porządku chronologicznym: stronę tytułową, spis treści, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz głównych publikacji stanowiących rozprawę, wykaz dodatkowych prac powiązanych z rozprawą, wykaz pozostałych osiągnięć Doktoranta, opis osiągnięcia naukowego, literaturę oraz oświadczenia o współautorstwie.

Podstawę rozprawy stanowi zbiór 4-ech spójnych tematycznie artykułów naukowych (PI÷PIV), opublikowanych w latach 2019÷2022 w czasopismach o zasięgu międzynarodowym, o sumarycznym współczynniku wpływu $IF = 12,439$ i liczbie punktów (wg. wykazu MEN) - 520. Wszystkie artykuły wchodzące w skład rozprawy są pracami współautorskimi, będącymi efektem badań wykonanych w trzy osobowym zespole badawczym. We wszystkich artykułach Doktorant jest pierwszym autorem, a jego udział jest dominujący, co wynika z załączonych do rozprawy oświadczeń współautorów. Udział Doktoranta w powstaniu trzech artykułów (PI÷PIII) stanowił 60%, a w jednym (PIV) 80%. Doktorant uczestniczył we wszystkich etapach powstania artykułów, poczynając od pomysłu, opracowania koncepcji badań, metodyki, wykonania układów badawczych, opracowania wyników badań, ich analizy, przygotowaniu artykułów do druku oraz wprowadzeniu korekty do manuskryptów.

Wszystkie 4-y artykuły zamieszczone w rozprawie (PI÷PIV), przed opublikowaniem były recenzowane. Obejmują łącznie 73 strony i zawierają 56 rysunków, 13 tabel oraz 25 wzorów.

Najogólniej, opracowana i będąca tematem rozprawy Doktoranta idea ograniczenia skutków przepływu prądu zwarciovego i eliminacji łuku awaryjnego w obwodzie dotkniętym

awarią, sprowadza się do maksymalnego skrócenia czasu łukowego (tj. przepływu prądu zwarciowego) i takiego obniżenia w nim napięcia, ażeby było niższe od napięcia palącego się łuku awaryjnego i prowadziło do jego zgaśnięcia. Podane cechy posiada opracowany przez Doktoranta dwusekcyjny, o cechach zwiernika, łącznik hybrydowy bocznikujący uszkodzony obwód. Jedną sekcję łącznika stanowi zespół półprzewodnikowy (który tworzy wielosekcyjny układ tyrystorów w różnej konfiguracji połączeń) odpowiedzialny za szybkość komutacji i obniżenie napięcia w uszkodzonym obwodzie, a drugą sekcję łącznik mechanizmowy (o zwłocznym działaniu) pozwalający na uzyskanie wysokiej obciążalności zwarciowej i ochronę zespołu półprzewodnikowego przed przegrzaniem. W konsekwencji oczekuje się powstania szybkiego hybrydowego zwiernika, współpracującego z działającymi ze znacznym opóźnieniem czasowym zabezpieczeniami nadprądowymi sieci elektroenergetycznej lub obwodu odbiorczego.

Zasadniczą część pracy stanowią 4-y spójne, tematycznie powiązane ze sobą artykuły (PI÷PIV) oraz rozdział 6 rozprawy, w którym oprócz celu i tezy, w sposób syntetyczny Doktorant przedstawił podstawowe, „krok po kroku”, wyniki badań opracowanego łącznika hybrydowego. Podane w rozdziale 6.4 analizy i badania, stanowią skompilowany fragment całościowych prac zawartych w artykułach PI÷PIV, mający uzasadnić przyjętą tezę oraz cele rozprawy (rozdział 6.2).

Zamieszczone w artykułach PI÷PIV analizy i badania, wykonane zostały dla trzech, kolejno rozwijanych, konstrukcji sekcji półprzewodnikowej łącznika hybrydowego:

- pierwotnej - przeznaczonej do weryfikacji przyjętej hipotezy zjawisk (Rys. 3, PI - Fig. 2, 3),
- modyfikowanej - z różnorodnym, wielowariantowym, kaskadowym połączeniem tyrystorów sekcji półprzewodnikowej (Rys. 4, 5, PII - Fig. 2, 3),
- autorskiej - bazującej na optymalnym rozwiązaniu sekcji półprzewodnikowej, dla której Doktorant wykonał kompleksowe badania zjawisk i efektów fizycznych łuku awaryjnego (Rys. 7, PIII - Fig. 3, PIV - Fig. 2, 3 i 6).

Zakres badań, przeprowadzonych na wymienionych konstrukcjach łącznika hybrydowego, był bardzo wszechstronny i szeroki. Obejmował badania:

- a) weryfikacyjne, oceniające możliwość wykorzystania przeciwsobnie połączonych tyrystorów sekcji półprzewodnikowej do szybkiego wyłączenia i ograniczenia prądu zwarciowego w obwodzie dotkniętym awarią oraz eliminacji łuku awaryjnego (PI),
- b) wpływu parametrów obwodu zwarciowego na czas trwania zwarcia (PI),

- c) wielu, kaskadowo połączonych i sekwencyjnie sterowanych układów (tyrystorów) gałęzi półprzewodnikowej bocznikującej miejsce awarii w celu zwiększenia obciążalności prądowej łącznika (PII),
- d) przyrostów ciśnienia wewnątrz zamkniętych obudów urządzeń elektrycznych z awaryjnym łukiem elektrycznym (PIII),
- e) stref rażenia awaryjnym łukiem elektrycznym (PIII),
- f) skutków elektrodynamicznych przepływu prądu zwarciovego ograniczonych przez łącznik hybrydowy (PIV),
- g) erozji torów prądowych podanych działaniu łuku elektrycznego (PIV),
- h) akustycznego oddziaływania łuku elektrycznego (PIV).

W zależności od celu i potrzeb, badania prowadzone były w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej o napięciu 230V i prądzie zwarciovym o amplitudzie do 1,3kA oraz w specjalnie opracowanym i wykonanym na potrzeby badań syntetycznym układzie wieloprądowym - dla prądów o amplitudzie w zakresie 5÷30kA.

Charakter prowadzonych badań wymagał wyposażenia stanowisk badawczych nie tylko w aparaturę rejestrującą sygnały pochodzące z różnych punktów pomiarowych, ale również wzajemnego ich przetworzenia i zsynchronizowania. W tym przypadku, Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną z obszarów nauk podanych w pkt.2, doświadczeniem praktycznym - związanym z budową i przygotowaniem stanowisk badawczych (zwłaszcza wieloprądowego) oraz umiejętnością analizy i interpretacji otrzymanych wyników badań.

Zamieszczone w pracach PI÷PIV badania, wymienione w pkt. a÷h, bogato ilustrowane są: przebiegami czasowymi napięć i prądów w obwodzie z łukiem awaryjnym oraz gałęzi półprzewodnikowej łącznika hybrydowego, rysunkami poglądowymi, wykresami graficznymi, zdjęciami bądź zestawione zostały w formie tabelarycznej. Interpretacja przebiegów czasowych ww. wielkości, analiza zjawisk, ocena wyników badań nie budzi zastrzeżeń i jest w korelacji z podanymi w artykułach modelami. Chronologia badań stanowi logiczną, spójną całość (poznanie zjawisk, optymalizacja, właściwości) oraz świadczy o umiejętności wyznaczania przez Doktoranta kierunku kolejnych badań zmierzających do realizacji postawionych w rozprawie celów.

Oprócz badań, prowadzone były szerokie analizy teoretyczne. Ich efektem są opracowane i podane w artykułach (PIII, PIV) modele: energii łuku awaryjnego, zmian ciśnienia w przestrzeni zamkniętej z palącym się łukiem awaryjnym, strefy rażenia awaryjnym łukiem elektrycznym, sił elektrodynamicznych oraz erozji toru prądowego odniesione do łącznika hybrydowego, zweryfikowane szerokimi badaniami eksperymentalnymi. Wykonane analizy porównawcze opracowanych modeli z wynikami badań, dla: znanych parametrów

obwodowych (prądu, napięcia łuku), geometrycznych środowiska i toru prądowego (np. objętość, odległość między przewodami toru prądowego, odległość od miejsca palenia się łuku awaryjnego...), stabelaryzowanych oraz zaczerpniętych z cytowanych w artykułach publikacji danych, w pełni potwierdziły poprawność przyjętych założeń i budowę modeli, jak też słuszność przyjętych w tezie rozprawy ograniczeń związanych ze stosowaniem łącznika hybrydowego do eliminacji łuku awaryjnego. Stanowią cenny, istotny i znaczący element rozprawy.

Zamieszczone w artykułach PI÷PIV oraz przedstawione w rozprawie analizy i badania eksperymentalne łącznika hybrydowego, przy zdecydowanym większościowym udziale Doktoranta (zwłaszcza w artykule PIV), prezentują wysoki poziom naukowy, zawierają elementy nowości naukowej o znaczącej wartości poznawczej i praktycznej oraz w pełni potwierdzają oczekiwania podane w celach rozprawy.

Niezależnie od wymienionych artykułów, do szczególnie istotnych i oryginalnych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć opracowanie autorskiej, oryginalnej i aplikacyjnej konstrukcji łącznika hybrydowego pozwalającej:

- skutecznie ograniczyć skutki cieplne i elektrodynamiczne przepływu prądu zwarciovego w torach prądowych obwodu dotkniętego łukiem awaryjnym,
- eliminować łuk awaryjny,
- ograniczyć zagrożenia spowodowane oddziaływaniem łuku awaryjnego (takie jak: efekt akustyczny, zmniejszenie niebezpiecznej strefy rażenia łukiem, zagrożenie pożarowe).

Podkreślić trzeba także:

- dużą staranność Doktoranta w przygotowaniu rozprawy pod względem edycyjnym, doborze szaty graficznej i poprawności językowej. Zauważone potknięcia nie mają istotnego wpływu na zawartość merytoryczną rozprawy,
- zrozumiały sposób prezentacji i interpretacji rezultatów badań, w których Doktorant wykazuje logiczną konsekwencję w realizacji celów na poszczególnych etapach rozprawy,
- umiejętność pracy i współpracy Doktoranta w zespole badawczym,
- dużą umiejętność Doktoranta w budowie różnych stanowisk badawczych, w tym przede wszystkim syntetycznego układu wielkoprądowego.

Reasumując, wyniki analiz i badań zamieszczone w rozdziale 6.4 rozprawy oraz w artykułach I÷IV w pełni potwierdzają postawioną przez Doktoranta tezę, a uzyskane ograniczenia (cele) i wymierne korzyści w pełni uzasadniają możliwość wykorzystania

łącznika hybrydowego, jako zabezpieczenia urządzeń rozdzielczych, elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej, obwodu odbiorczego od zagrożeń powstałych w wyniku pojawienia się awaryjnego łuku elektrycznego.

Nie oznacza to jednak, że opracowany autorski łącznik hybrydowy nie wymaga przeprowadzenia dalszych badań laboratoryjnych, obejmujących, między innymi, wyznaczenie charakterystyk czasowo-prądowych, całek Jouel'a, prądów ograniczonych, itp..

Uzyskanie wymienionych efektów wynikających ze stosowania łącznika hybrydowego nie byłoby możliwe, przy braku precyzyjnego sterowania tyrystorami gałęzi półprzewodnikowej. Problem sprowadza się nie tylko do bezzwłocznego wykrycia awaryjnego łuku elektrycznego, ale przede wszystkim wyzwolenia tyrystorów w odpowiednim czasie i określonej sekwencji. Opracowanie takiego układu wyzwalającego, pracującego w silnym polu magnetycznym, stanowi również znaczące i istotne osiągnięcie Doktoranta.

4. Uwagi dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne i dyskusyjne, wymagające ustosunkowania się Doktoranta:

1. W rozprawie i artykułach Doktorant skupił się na sekcji półprzewodnikowej łącznika hybrydowego. Nie znajduję szerszej informacji o łączniku mechanizmowym drugiej sekcji. Proszę podać: co to za łącznik, jakie ma parametry znamionowe oraz czas własny.
2. W analizach i badaniach Doktorant skoncentrował się głównie na zaletach wynikających ze stosowania łącznika hybrydowego do likwidacji łuku awaryjnego w zabezpieczonym nim obwodzie odbiorczym. W rozprawie nie analizowano przebiegów czasowych napięć i prądów w sieci zasilającej przed, podczas i po zadziałaniu łącznika hybrydowego. Zatem, czy lub jakie zagrożenia może stwarzać łącznik hybrydowy w sieci zasilającej podczas wyłączenia łuku awaryjnego.
3. Rzeczywista elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna i zasilająca jest siecią trójfazową, w której w zdecydowanej większości dominują zwarcia jednofazowe, mogące przekształcić się dalej w zwarcia dwu i trójfazowe. Jak widzi Doktorant możliwość wykorzystania, lub modyfikacji i adaptacji, opracowanego łącznika hybrydowego w sieci trójfazowej.
4. Powszechne jest stosowanie, zwłaszcza w sieci rozdzielczej nN, rozłączników bezpiecznikowych, od których wymaga się selektywnej współpracy z zabezpieczeniami przetężeniowymi obwodów odbiorczych. W związku z tym, jakimi kryteriami należy kierować się przy weryfikacji selektywności działania łącznika hybrydowego z wymienionymi zabezpieczeniami przetężeniowymi.
5. Przepływ prądu zwarciovego przez sekcję półprzewodnikową w czasie niezbędnym do zadziałania łącznika mechanizmowego o zwłocznym działaniu prowadzi do nagrzewania

złączy tyrystora. Czy podczas badań mierzono temperaturę złączy i próbowano oszacować maksymalny dopuszczalny czas przepływu prądu zwarcioowego przez tyrystory sekcji półprzewodnikowej oraz wymagany czas własny łącznika mechanizmowego.

6. Czy odskoki styków podczas załączania łącznika mechanizmowego mogą mieć wpływ na poprawność działania łącznika hybrydowego i nie stanowią zagrożenia dla tyrystorów sekcji półprzewodnikowej.
7. Łuk awaryjny może mieć także charakter przemijający. Czy tego typu wyładowanie łukowe jest wystarczające do zadziałania łącznika hybrydowego oraz jakich zjawisk można spodziewać się w sieci zasilającej i bocznikowanym obwodzie, zawierającym kondensatory i transformatory - zwłaszcza nieobciążone.
8. W jaki sposób bądź jaką metodą określana była strefa rażenia łukiem awaryjnym (norma: IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. IEEE Std 1584-2018).

Uwagi szczególne, drobne usterki i dostrzeżone nieścisłości:

Podane niżej uwagi dotyczą przede wszystkim zawartości rozdziału 6.4.

- Rys. 3 - brak w podpisie rynku opisu elementów składowych obwodu testowego półprzewodnikowego eliminatora łuku,
- Rys. 4, 5 - podobna uwaga jak w przypadku Rys. 3,
- Str. 16 - jest „wynika to głównie z ilości i rodzajów zastosowanych tyrystorów”, powinno być „...z liczby i rodzajów...”,
- Str. 19 - brak jednoznaczności opisu wartości prądów probierczych...wartość skuteczna, amplituda, wartość szczytowa,
- Str. 21 - nieścisłość. W tekście podana jest odległość pomiędzy przewodami $a = 2$ mm, a zaznaczona na Rys. 10 odległość wynosi 10 mm,
- Str. 24 – jest „ciśnienie akustyczne o wartościach dochodzących do 150 kB”, powinna być „natężenie dźwięku ...”,
- Str. 25 – jest „Odległości te,...”, nie ładnie wygląda wyraz i brzmi słowo „te”,
- Str. 30 – jest „Natomiast dla tych samych wartości prądów (10 i 20 kA)...”, powinno być „Dla tych samych wartości”,
- Uwaga ogólna. Nie rozpoczyna się zdania słowem: Rysunek X....

5. Podsumowanie

Tematyka rozprawy (pracy) wymagała od Doktoranta szerokiej znajomości zjawisk nie tylko z zakresu elektroenergetyki, ale również z obszaru: elektroniki, teorii przetwarzania sygnałów, sterowania, mikroprocesorów... Związana była także z czasochłonną, wymagającą

znacznych nakładów finansowych, budową wielu specjalistycznych stanowisk badawczych oraz umiejętnością wykorzystania posiadanej przez Doktoranta wiedzy z ww. obszarów.

W zdecydowanej większości praca ma charakter eksperymentalny, nie symulacyjny, zakończony konkretnym efektem aplikacyjnym, tj. opracowaniem i wykonaniem autorskiego łącznika hybrydowego.

Przedstawione w pracy oraz w załączonych artykułach analizy i badania prezentują wysoki poziom naukowy, zawierają elementy nowości naukowej o znaczącej wartości poznawczej, a co należy podkreślić - przede wszystkim praktycznej. Doktorant rozwiązał postawione sobie zadanie naukowe, udowodnił zamieszczoną w rozprawie tezę i cele oraz wykazał, że posiada umiejętność rozwiązywania problemów naukowych oczekiwaną od kandydatów ubiegających się o stopień naukowy doktora. Praca spełnia wszystkie wymogi ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Biorąc pod uwagę także całokształt dorobku naukowego Doktoranta, występuje do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej z wnioskiem o przyjęcie pracy i dopuszczenie do publicznej obrony.

W uznaniu wysokiego poziomu naukowego pracy, kolosalnej pracowitości prowadzonych prac badawczych oraz aplikacyjnego efektu wykonanej pracy, stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy przez Radę Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej w stosownym trybie.

