

prof. dr hab. inż. Zbigniew Leonowicz
Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii
Wydział Elektryczny
Politechnika Wrocławska

Wrocław, 1/04/2023

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
Technologia Kosmiczna

Wpłynęło dnia 15.04.2023

Przebiegło dnia 15.04.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: *Comparative analysis and implementation of selected new alternating current electric arc models*

Autor rozprawy: mgr inż. Maciej Klimas

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Dariusz Grabowski, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Dawid Bula

Dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych

Dyscyplina: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Macieja Klimasa, która została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Moniki Kwok, prof. PŚ, wyrażone w uchwale Rady Dyscypliny AEEITK nr 6/2023 z dnia 28.02. 2023 r.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska skupia się na opracowaniu nowych i dokładnych modeli zjawiska łuku elektrycznego w piecach łukowych, szczególnie w trakcie etapu topienia. Modele opierają się na danych z rzeczywistych pieców i są zdolne do odwzorowania zarówno składowej deterministycznej, jak i stochastycznej zachowania pieca. Zaproponowano i oceniono cztery różne podejścia, a modelem opartym na losowym równaniu różniczkowym wybrano do implementacji w oprogramowaniu symulacyjnym EMTP-ATP. Analiza dostarcza również przeglądu nowoczesnych metod symulacji i sugeruje obszary dalszych badań. Io tematyka ważna i aktualna, zarówno z poznawczego jak i z aplikacyjnego punktu widzenia. Dysertacja napisana jest w języku angielskim, zawiera łącznie 131 stron i składa się z 9. rozdziałów, poświęconych kolejno:

Rozdział 1. Wprowadzenie podkreśla znaczenie rozwoju technologicznego dla rozwoju społecznego i przemysłowego oraz potrzebę skupienia się na optymalizacji istniejących rozwiązań w celu zmniejszenia kosztów energetycznych i finansowych. Podkreśla się w nim również znaczenie redukcji niepotrzebnych strat związanych z przesyłem i wykorzystaniem energii elektrycznej. Sektor przemysłowy ma znaczący wkład w globalne zużycie energii, a piece łukowe (LAF), stosowane głównie w produkcji stali, są jednymi z najbardziej problematycznych obciążeń elektrycznych. EAF powodują silne i losowe zmiany w zużyciu energii, co zmniejsza jakość energii elektrycznej i zwiększa niechciane straty. Badania przedstawione w pracy mają na celu opracowanie bardziej dokładnych modeli EAF do symulacji obwodów w dziedzinie czasu na podstawie różnych podejść teoretycznych i rzeczywistych danych pomiarowych, w tym właściwości stochastycznych zjawiska łuku. Konkretnie cele obejmują opracowanie modelu odzwierciedlającego właściwości stochastyczne łuku i porównanie go z istniejącymi modelami deterministycznymi. Proponowane modele mają być opracowane na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych uzyskanych z trzech niezależnych pieców o różnych rozmiarach. Główną hipotezą jest, że jest możliwe opracowanie nowych modeli stochastycznych EAF na podstawie różnych podejść teoretycznych, wykorzystując rzeczywiste dane pomiarowe, tak aby ich dokładność była wyższa niż istniejących modeli deterministycznych.

Przegląd literatury jest kompletny i logiczny w swojej prezentacji. Rozpoczyna się od opisu historycznego rozwoju technologii topienia łukowego i jej udoskonalenia na przestrzeni lat. Następnie artykuł skupia się na znaczeniu właściwości elektrycznych EAF, problemach związanych z jakością mocy oraz metodach stosowanych do łagodzenia tych problemów. Przegląd przechodzi następnie do modelowania EAF, które jest szeroko badane przez naukowców za pomocą różnych metod. Autor podkreśla najpopularniejsze podstawowe modele łuku i ich ulepszenia. Przegląd kończy się krótkim wspomnieniem o stosowaniu sztucznych sieci neuronowych i metod uczenia się głębokiego w dziedzinie modelowania EAF. Niektóre sekcje mogłyby być rozszerzone, aby dostarczyć więcej informacji. Na przykład Autor mógłby podać więcej szczegółów na temat systemów poprawy jakości energii i ich funkcjonowania. Dodatkowo, choć Autor wspomina o stosowaniu sztucznych sieci neuronowych i metod uczenia się głębokiego w dziedzinie modelowania EAF, mógłby przedstawić więcej przykładów ich zastosowania i skuteczności.

Podrozdział 1.2 przypomina model EAF oparty na równowadze mocy, który jest deterministycznym modelem opartym na równaniu różniczkowym opisującym zjawisko łuku elektrycznego w piecach łukowych (EAF). Model opiera się na zasadzie zachowania energii i zakłada, że moc elektryczna dostarczana do płonącego łuku jest równoważona między dwoma składnikami: mocą przekazywaną do otoczenia w postaci ciepła i mocą zwiększającą energię nagromadzoną przez kolumnę łuku. Model stosuje kilka założeń, takich jak cylindryczny kształt kolumny łuku i jej jednorodność na całej długości. Rozdział kończy się przykładową charakterystyką napięciowo-prądową łuku obliczoną przy użyciu proponowanych współczynników, które silnie wpływają na kształt charakterystyki. Model ten jest szeroko stosowany w różnych zastosowaniach inżynierii elektrycznej i został uznany za jeden z najważniejszych modeli łukowych przez grupę roboczą IEEE ds. Modelowania i Symulacji Harmonicznych.

W rozdziale 2, zaprezentowano piec łukowy elektryczny (EAF), który jest używany w przemyśle do nagrzewania elektrycznego. EAF wykorzystują ciepło generowane przez zjawisko łuku elektrycznego do topienia ładunku i mogą działać zarówno z zanurzonym, jak i otwartym łukiem. EAF prądu przemiennego są głównie konstruowane jako urządzenia trójfazowe z mechaniczną strukturą składającą się z podpory pokrytej materiałami ogniotrwałymi, ładunku metalowego i elektrod. Zasilanie EAF składa się z dwóch głównych sekcji. Obwód pierwotny ma dodatkowe urządzenia związane z działaniem sieci, poprawą jakości energii oraz systemami regulacji i kontroli pieca. Transformator pieca obniża napięcie średnie sieci na niskie napięcie zasilające elektrody. Każdy element instalacji EAF przyczynia się do powstania oporu i indukcyjności obwodu. Ten fakt jest szczególnie ważny podczas wykonywania jakichkolwiek pomiarów w takim systemie. Kolejny podrozdział omawia ważność dokładnego modelowania pieca łukowego (EAF) podczas procesu topienia w celu symulowania najgorszego scenariusza oraz projektowania obiektu przemysłowego, który wytrzyma jego ciągłą pracę. Proponowane modele opierają się wyłącznie na rzeczywistych danych pomiarowych zebranych podczas pomiarów różnych EAF o różnych rozmiarach. Autor omawia różne punkty pomiarowe na EAF i dochodzi do wniosku, że niskonapięciowa strona transformatora pieca jest najlepszym punktem pomiarowym. Autor przedstawia dane pomiarowe dla dużego przemysłowego EAF-u znajdującego się w Iranie, małego przemysłowego EAF oraz EAF laboratoryjnego. Rozdział prezentuje fazy napięcia i kształt fal prądu zmierzone w dużym przemysłowym EAF i omawia wpływ spadków napięcia na modelowanie łuku.

Rozdział 3, poświęcono omówieniu stochastycznego modelu EAF, który uwzględnia składową losową w swojej strukturze, aby uwzględnić przypadkowy charakter zjawiska łuku elektrycznego. Model zakłada, że współczynniki równania bilansu mocy opisujące zachowanie łuku są procesami stochastycznymi. Można wyróżnić dwa główne składniki stochastyczne - niskiej i wysokiej częstotliwości - które mogą być opisane za pomocą oddzielnych procesów stochastycznych. Składnik niskiej częstotliwości może być reprezentowany za pomocą pełnego lub uproszczonego równania bilansu mocy z trzema lub dwoma procesami stochastycznymi, odpowiednio reprezentującymi jego współczynniki. Składnik wysokiej częstotliwości może być traktowany jako oddzielny proces stochastyczny. Procedura identyfikacji procesów stochastycznych może być przeprowadzana na dwa

różne sposoby, gdzie drugi sposób obejmuje korelację kolejnych wartości. Zmodyfikowane równanie obliczania napięcia łuku jest wyrażone jako funkcja procesów stochastycznych. Procedura estymacji współczynników jest proponowana na podstawie danych pomiarowych, które obejmują podział danych na ramki i optymalizację wartości współczynników dla każdej ramki, aby zminimalizować rozbieżność między obliczanym a zmierzonym napięciem. Analiza wskazuje, że optymalna długość ramki zależy od symetrii charakterystyki V-L.

Podrozdział "3.2 Wyniki symulacji i analiza" przedstawia wyniki opracowanych modeli dla pieców łukowych elektrycznych (EAF) o różnych rozmiarach. Modele zostały opracowane z użyciem składowej stochastycznej, aby uwzględnić losowy charakter zjawiska łuku elektrycznego. Modele zakładają, że współczynniki równania bilansu mocy, które opisują zachowanie łuku, są procesami stochastycznymi. Można zidentyfikować dwie główne składowe stochastyczne, niskoczęstotliwościową, reprezentowaną przez pełne równanie z trzema procesami stochastycznymi oraz wysokoczęstotliwościową, zidentyfikowaną jako bardziej skomplikowany proces stochastyczny. Wyniki analizy dużego zestawu danych przemysłowych EAF pokazują, że zaproponowane podejście jest skuteczne w poprawie dokładności modelu. Optymalne wartości współczynników k_j zostały obliczone przy założeniu, że zmieniają się one z okresu na okres, co prowadzi do redukcji błędów RMSE o 27%. Zaproponowana metoda generowania wartości k_j została zaimplementowana przy użyciu metody funkcji odwrotnej dystrybucyjnej. Wysokoczęstotliwościowe składowe sygnału napięciowego EAF zostały przeanalizowane przy użyciu modelu MA z czterema składowymi. Ogólny model RDE może być zaimplementowany poprzez zastosowanie równania bilansu mocy z współczynnikami k_j , które są generowane niezależnie dla kolejnych ramek przez dyskretne procesy czasowe opisane w tym rozdziale, z dodatkowym wysokoczęstotliwościowym sygnałem napięciowym dodanym do wyjścia napięcia. Wyniki sugerują, że zaproponowany model jest zdolny do odwzorowywania stochastycznych wahań charakterystyki EAF w szerokim spektrum częstotliwości. Rozdział przedstawia szczegółową i dobrze zorganizowaną analizę opracowanych modeli oraz ich skuteczność w symulowaniu zachowania EAF.

Kolejny podrozdział przedstawia analizę K1, K2 i K3 dla małego przemysłowego pieca łukowego (EAF). Zbiór danych jest dzielony na ramki o długości pół okresu na podstawie wykrytych przecięć ze 0. Realizacje procesów K_j dla tego przypadku mają różne rozkłady i zakres w porównaniu do dużego pieca przemysłowego. Badania pokazują, że proponowane podejście poprawia dokładność modelu małego przemysłowego EAF o około 40%, co jest lepsze niż dla dużego pieca przemysłowego. Składowa o wysokiej częstotliwości małego EAF została również przeanalizowana za pomocą modelu MA z czterema składowymi. Ogólny kształt sygnału wyjściowego modelu odzwierciedla stochastyczne zmiany charakterystyki EAF w szerokim spektrum częstotliwości.

Następny podrozdział prezentuje analizę K1, K2 i K3 dla zbioru danych z laboratoryjnego pieca łukowego (EAF). Zbiór danych został podzielony na ramki długości pół okresu na podstawie wykrytych przejść przez zero. Realizacje procesów K_j dla tego przypadku zostały przedstawione i porównane z tymi uzyskanymi z dużych i małych pieców przemysłowych. Rozkłady i zakresy K_j dla tego EAF różnią się znacznie od tych dla dużego pieca przemysłowego, ale są bardziej podobne do tych dla małego pieca przemysłowego. Następnie rozdział przedstawia graficzne reprezentacje realizacji oraz niektóre ich właściwości statystyczne. Badanie pokazuje, że proponowane podejście poprawia dokładność modelu dla laboratorium EAF o około 70%. Jest to najlepszy wynik spośród wszystkich testowanych zbiorów danych i jest silnie związany z asymetrią obserwowaną w danych pomiarowych. Zastosowana metoda była metodą odwrotnej funkcji dystrybucyjnej (inverse CDF). Przedstawiono przykładową realizację napięcia wyjściowego, a model wykazuje zachowanie podobne do danych pomiarowych. Dla laboratoryjnego EAF, składowa wysokiej częstotliwości została przebadana oddzielnie. Zastosowanie filtra dolnoprzepustowego do pomiaru napięcia umożliwiło uzyskanie sygnału przedstawionego na rys. 3.22. Fala wydaje się stochastyczna, a badanie oparte na kryterium informacyjnym wskazało, że optymalne wyniki uzyskuje się poprzez symulowanie serii procesami MA z trzema składnikami.

Kolejny podrozdział prezentuje rozszerzoną analizę dużego przemysłowego pieca łukowego (EAF). Autor użył modelu zawierającego dwa procesy stochastyczne, K1 i K2, które zostały zidentyfikowane i

szczegółowo przeanalizowane przy użyciu metod statystycznych. Podzielono realizacje procesów stochastycznych K1, K2 i K3 według K1 i uzyskano sekwencje czasowe $\hat{K}1$ i $\hat{K}2$. Następnie przeprowadzono analizę tych sekwencji oddzielnie. Dla sekwencji $\hat{K}1$ Autor dokonał szczegółowego zbadania realizacji $\hat{K}1$. Przekształcił dane przy użyciu transformacji Box-Cox i obliczył funkcje autokorelacji i cząstkowej autokorelacji przekształconych danych oraz ich przyrostów. Autor dopasował następnie współczynniki procesu ARIMA do danych pomiarowych i uzyskał model ARIMA(1,1,2). Dla sekwencji $\hat{K}2$ Autor obliczył funkcje autokorelacji i cząstkowej autokorelacji i stwierdził, że proces jest szumem białym. Następnie zbadał rozkład wartości i stwierdził, że jest to rozkład dwumodalny. Rozkład ten można opisać przesuniętym mieszanym rozkładem Weibulla lub przesuniętym mieszanym rozkładem Gamma. Okazuje się, że najlepiej dopasowanym rozkładem dla białego szumu $\hat{K}2$ jest przesunięty mieszanym rozkład Weibulla z dwoma składnikami.

Rozdział 4 omawia model o nazwie Chaotic EAF, który imituje stochastyczne zmiany w piecach łukowych EAF, wykorzystując układy chaotyczne. Autor argumentuje, że włączenie zachowań chaotycznych do modelu EAF pozwoli na badanie wielu różnych dróg rozwoju przy zachowaniu dokładnej natury i kolejności zdarzeń przypominających losowe.

Dyskusyjnym punktem w rozumowaniu Autora jest, kiedy sugeruje on, że choć system chaotyczny przybliża zachowanie stochastyczne, to wciąż jest on deterministyczny. Ta teza może być niewłaściwa, ponieważ zachowanie chaotyczne jest często nieprzewidywalne i wrażliwe na warunki początkowe. Ponadto nie jest jasne, jak zmodyfikowany system chaotyczny pasuje do danych pomiarowych EAF, oraz jak dokładnie system chaotyczny przybliża zachowanie EAF.

Kolejne podrozdziały omawiają różne systemy chaotyczne oraz ich modele matematyczne. Objąsnione są układ Chua, system Lorenza, system Rösslera oraz system czteroskrzydłowego atraktora chaotycznego wraz z odpowiadającymi im równaniami różniczkowymi i parametrami.

Ostatnie podrozdziały omawiają wyniki symulacji i analizę modelu chaotycznego opartego na danych pomiarowych z pieca łukowego EAF. Wyniki przedstawiono dla pieców EAF o różnych rozmiarach: dużej instalacji przemysłowej, małej przemysłowej i laboratoryjnej. Dla każdej kombinacji systemu chaotycznego i współczynnika K_j obliczony zostaje błąd za pomocą odległości euklidesowej znormalizowanych współrzędnych reprezentowanych przez wartości funkcji celu od punktu idealnego (0, 0). Najlepsze rozwiązania są wybierane na podstawie najniższego błędu. Główna różnica w proponowanym modelu polega na tym, że w modelu chaotycznym dyskretno-czasowe wartości K_j są generowane za pomocą autonomicznych, zoptymalizowanych równań różniczkowych systemu chaotycznego.

Możliwym błędem wnioskowania w tym rozdziale jest założenie, że najlepiej dopasowany model oparty na określonej kombinacji systemu chaotycznego i współczynnika K_j dokładnie odzwierciedla fizykę systemu EAF. Wyniki mogą nie być reprezentatywne dla innych zbiorów danych lub systemów EAF i dlatego uogólnienie wyników musi być dokonywane z ostrożnością.

Wreszcie, nie jest jasne, w jaki sposób proces optymalizacji zmiennych decyzyjnych wpływa na ogólną wydajność modelu.

Rozdział 5 poświęcono problemowi wykorzystania sztucznych sieci neuronowych (ANN) do modelowania pracy pieców łukowych (EAF). ANN mogą tworzyć modele czarnej skrzynki lub szarej skrzynki, które wykorzystują dane wejściowe i wyjściowe, aby osiągnąć dobrą dokładność modelu. W tekście przedstawiono kilka modeli ANN, w tym wielowarstwowy perceptron (MLP), podwójny MLP i sieci długiej pamięci krótkoterminowej (LSTM).

Nie omówiono problemu nadmiernej generalizacji lub nadmiernego uproszczenia dokładności modeli ANN oraz przyjęto nieuzasadnione założenie, że wszystkie zjawiska EAF można modelować za pomocą ANN. Ponadto, tekst nie omawia ograniczeń modeli ANN ani potencjalnych kompromisów między dokładnością a złożonością modelu.

Podrozdział 5.1.2 przedstawia strukturę i proces trenowania sieci LSTM, a także sugeruje, że takie sieci mogą dokładnie odzwierciedlać sekwencje czasowe przypominające procesy stochastyczne.

Model LSTM jest ograniczony do dokładnego odwzorowania niskoczęstotliwościowych składowych charakterystyki EAF, a druga składowa jest wymagana do modelowania wysokoczęstotliwościowych zmian obserwowanych na przebiegach napięcia pomiarowego. Wysokoczęstotliwościowa składowa jest generowana przez oddzielną, czwartą sieć LSTM, która jest trenowana z sygnału wysokoczęstotliwościowego uzyskanego poprzez filtrowanie przebiegu napięcia pomiarowego.

Tutaj także nie uwzględniono możliwości zbyt dużego uproszczenia złożoności modelowania EAF i przyjęto założenie, że sieci LSTM są jedynym rozwiązaniem dla dokładnego modelowania. W tekście nie omówiono również potencjalnych ograniczeń i kompromisów między dokładnością a interpretowalnością wynikającymi z użycia metod uczenia głębokiego.

Podrozdziały kolejne opisują badania sztucznych sieci neuronowych (ANN) modeli pieców łukowych (EAF) poprzez serię symulacji. Dane uzyskane podczas treningu poszczególnych sieci zostały pogrupowane na części związane z płytkimi modelami i modelami uczenia głębokiego. Wyniki uzyskane dla dużych przemysłowych, małych przemysłowych i laboratoryjnych EAF opisano osobno. W fragmencie wyjaśniono również rozwój różnych modeli ANN, w tym MLP, podwójnego MLP, M-NARX i LSTM, aby odzwierciedlić nieliniowość, histerezę i dynamiczne zmiany w charakterystycznych krzywych V-I pieców EAF. Autor ponadto opisuje wyniki osiągnięte przez płytke i głębokie sieci neuronowe dla małych EAF w przemyśle oraz dla pieca laboratoryjnego. Wyniki dla płytkich sieci neuronowych pokazują, że sieci MLP radzą sobie lepiej niż model M-NARX, jednak dokładność jest ograniczona przez asymetrię danych. W przypadku głębokich sieci neuronowych, w szczególności sieci LSTM, osiągnięto poprawę wyników i możliwość modelowania zarówno danych niskiej, jak i wysokiej częstotliwości.

Rozdział 6 przedstawia jako cel poprawę samej składowej deterministycznej w celu ulepszenia modelu deterministycznego równania bilansu mocy łuku elektrycznego. Konkretnie, następne sekcje odnoszą się do pytania, czy łuk elektryczny może być modelowany bardziej dokładnie przy użyciu równania bilansu mocy, ale uogólnionego poprzez uwzględnienie ułamkowego operatora całkowo-różniczkowego zamiast klasycznego różniczkowania rzędu 1.

W kolejnych podrozdziałach przedstawione i przeanalizowane zostały wyniki uzyskane z symulacji modelu ułamkowego dla dużych i małych przemysłowych pieców łukowych (EAF). Głównym celem symulacji było oszacowanie rzędu α równania modelu oraz współczynników k_j . Przetestowano dwie główne koncepcje, jedną zmiennego rzędu niecałkowitego i jedną stałego rzędu niecałkowitego operatora całkowo-różniczkowego. Wyniki pokazują, że wprowadzenie zmiennej wartości rzędu α prowadzi do lepszego dopasowania symulowanego przebiegu napięcia do danych pomiarowych. Rząd ułamkowy wykazuje zachowanie podobne do realizacji procesu stochastycznego, z medianą w okolicach 0,6. Obliczono błąd między symulowanym napięciem z klasycznym $\alpha=1$ oraz $\alpha=\text{var}$, a zmierzoną wartością napięcia, a błąd ten charakteryzuje mniejszy błąd w danych pomiarowych niż w przypadku podejścia klasycznego. Błędy związane z każdym okresem zostały zwizualizowane przy użyciu wykresu pudełkowego, a wprowadzenie zmiennej wartości rzędu α skutkowało zmniejszeniem błędów w wartości mediany i ogólnym rozkładzie. Przypadek zmiennego rzędu ułamkowego charakteryzuje się najwyższym potencjałem poprawy, zbliżonym do 25%. Wynik minimalnego błędów uzyskanego z analizy ze stałym α jest nieznacznie gorszy, a wynik dla mediany α obliczonej ze stochastycznej realizacji jest najgorszy, z poprawą wynoszącą około 20%. Warto zauważyć, że każde proponowane zastosowanie rzędu ułamkowego w modelowaniu EAF skutkuje znaczącą poprawą dokładności modelu.

Rozdział 7 omawia analizę porównawczą różnych modeli EAF, które zostały opracowane w poprzednich rozdziałach. Rozdział rozpoczyna się od wymienienia różnych modeli EAF, które zostały zaproponowane, takich jak model równania różniczkowego losowego, model chaotyczny, modele sztucznych sieci neuronowych, model rzędu ułamkowego i inne. Następnie rozdział omawia jakościową ocenę proponowanych modeli i prezentuje Tabelę 7.1, która zawiera cechy każdego z modeli. Rozdział porównuje również przykładowe realizacje przebiegu napięcia wyjściowego wykonane przez każdy z modeli. Prezentowany jest diagram, który pokazuje metodę przetwarzania

danych dla analizy porównawczej. Rozdział kończy stwierdzeniem, że płytkie modele sztucznych sieci neuronowych mają bardzo ograniczoną zdolność do odzwierciedlenia właściwych zmian kształtu przebiegu napięcia między okresami symulacji, podczas gdy modele stochastyczne mają tendencję do przeceniania tych zmian. Nie omówiono ograniczeń lub słabości analizy porównawczej.

Rozdział 8 omawia implementację modelu RDE pieca łukowego w oprogramowaniu ETMP-ATP. Model RDE składa się z trzech głównych bloków strukturalnych, w tym części deterministycznej, niskoczęstotliwościowych zmian stochastycznych i dodatku o wysokiej częstotliwości. Implementacja obejmuje nieliniowy rezystor reprezentujący opór łuku, którego wartość zmienia się w każdym kroku rozwiązania. Implementacja modelu RDE składa się z różnych kroków, w tym implementacji równań z rozdziału 3, generowania procesów stochastycznych i ich implementacji w języku MODELS. Rozdział zawiera również szczegóły implementacji K1. Podsumowanie mogłoby zostać rozszerzone o więcej szczegółów.

W kolejnych podrozdziałach zaimplementowano równania przedstawione w poprzedniej sekcji w języku MODELS w kodzie sterującym odpowiednim nieliniowym rezystorem. Użyto oprogramowania EMTP-ATP do symulowania prostego obwodu testowego składającego się z źródła napięcia, rezystancji i indukcyjności, który symuluje wpływ szyn zbiorczych, przewodów i modelu łuku. Wyniki przedstawione w kolejnych podsekcjach wynikają z obliczenia oczekiwanej rezystancji obliczonej przez solver języka MODELS. Zamiast samej rezystancji, do analizy wydajności wykorzystywane jest napięcie łuku wyjściowego. Autorzy przedstawiają wyniki generowane przez model tylko dla składowej deterministycznej, deterministycznej i stochastycznej oraz deterministycznej z obiema składowymi stochastycznymi.

Prezentowano również model trójfazowy, który jest potrojoną wersją modelu jednofazowego. Model łuku zaimplementowanego w oprogramowaniu EMTP-ATP i została to zweryfikowana przy użyciu modelu jednofazowego. Graficzna reprezentacja porównania rezystancji obliczonej przez kod MODELS z rezystancją nieliniowego rezystora przedstawionego na rys. 8.2, obliczonej na podstawie zmiennych pomiarowych ATP, wskazuje na jej spójność.

Jednakże jest kilka niejasnych zdań, takich jak *"The results provided in the following subsections arise from the calculation of the expected resistance computed by the MODELS language solver"*. Ponadto stwierdzono, że *"It is related to the simplifying assumptions that the single-phase arc can exist independently from the remaining EAF phase 1"*, co jest mylące, ponieważ jednocześnie stwierdzono, że to założenie nie jest prawdziwe w rzeczywistym urządzeniu trójfazowym, gdzie uzwojenia wtórne transformatora są połączone w konfiguracji delta, gdzie pojedynczy łuk fazowy nie może istnieć.

Rozdział 9 to podsumowanie, w którym Doktorant przedstawił w sposób syntetyczny wykonane prace i uzyskane rezultaty oraz plan dalszych prac. W tym rozdziale Autor podsumowuje rozwój różnych modeli pieców łukowych z wykorzystaniem danych pomiarowych, które są silnie nieliniowe i mają znaczący wpływ na systemy energetyczne i jakość zasilania ze względu na ich nieprzewidywalne zachowanie. Proponowane modele opierają się na rzeczywistych danych pomiarowych i umożliwiają uwzględnienie przebiegów stochastycznych. Badania obejmowały opracowanie modeli opartych na trzech różnych zbiorach danych pomiarowych dla pieców łukowych, badanie wyników numerycznych oraz wieloaspektowe ich porównanie. Poziom dokładności modeli jest ograniczony faktem, że zbiory danych są ograniczone. Autor zaproponował cztery różne modele dla pieców łukowych, w tym model stochastyczny oparty na losowych równaniach różniczkowych, model ANN, model oparty na sygnałach chaotycznych oraz model oparty na operatorze rzędu ułamkowego. Autor przeanalizował również zasoby obliczeniowe potrzebne do opracowania i działania każdego modelu. Niektóre fragmenty mogłyby być bardziej klarowne lub spójne, np. wyjaśnienie sposobu porównania modeli, ponieważ nie jest w pełni jasne, jak te porównania zostały wykonane. Ponadto Autor wspomina, że ilość informacji ze zbiorów danych jest wystarczająca do opracowania i dokładnego opracowania modeli, ale nie wyjaśnia, jakie informacje są wystarczające lub jakie są z tym związane ograniczenia.

Ponadto nie wspomina się o znaczeniu wyników ani o tym, w jaki sposób mogą być one zastosowane w przemyśle.

Rozprawę uzupełnia spis literatury, który liczy 72 pozycje. Zaprezentowana bibliografia jest aktualna, istotna i kompleksowa w zakresie tematu pieców łukowych. Obejmuje ona publikacje z ostatnich lat i dotyczy różnych aspektów pieców łukowych, takich jak modelowanie, jakość energii, efektywność energetyczna i kontrola procesu.

Układ pracy jest poprawny. Praca zawiera spis używanych skrótów, listę tabel oraz listę ilustracji. Treści rozprawy zostały logicznie podzielone na rozdziały, a ich zawartość i zakres nie budzi zastrzeżeń.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

- a. Opracowanie kilku nowych modeli dla pieców łukowych (EAF), zwłaszcza skierowanych na wprowadzenie komponentów stochastycznych do tych modeli,
- b. Badanie różnych podejść teoretycznych, w tym opracowanie modeli na podstawie trzech różnych rzeczywistych zbiorów danych pomiarowych EAF, analizy numerycznej i wieloaspektowego porównania,
- c. Wybór najlepszego modelu poprzez analizę porównawczą oraz jego bezpośrednie zaimplementowanie w oprogramowaniu symulacyjnym EMTP-ATP dla dziedziny czasowej,
- d. Redukcja błędów w obliczeniach napięcia poprzez implementację modelu, który zakłada reprezentację współczynników za pomocą procesów stochastycznych zamiast stałych wartości,
- e. Zastosowanie zoptymalizowanych sygnałów chaotycznych w modelowaniu EAF oraz porównanie różnych systemów chaotycznych,
- f. Opracowanie kilku różnych modeli sztucznych sieci neuronowych (ANN), w tym płytkich i głębokich sieci uczących, zdolnych do odzwierciedlania stochastycznych zmian w charakterystyce EAF,
- g. Wprowadzenie nowego ułamkowego operatora do części deterministycznej równania bilansu mocy, co prowadzi do poprawy odwzorowania charakterystyki EAF.

Nowość tych osiągnięć polega na ich zdolności do dokładnego modelowania zachowań stochastycznych EAF, które wcześniej stanowiły znaczne wyzwanie w inżynierii elektrycznej. Badania są w pełni weryfikowane przez rzeczywiste dane pomiarowe, co czyni modele stosowanymi w rzeczywistych scenariuszach. Włączenie różnych podejść teoretycznych, w tym procesów stochastycznych, systemów chaotycznych i głębokich sieci uczących, zapewnia kompleksowe rozwiązanie dla dokładnego modelowania EAF, co ma pozytywne konsekwencje dla systemów zasilania i jakości mocy. Dodatkowo, zaimplementowanie modeli bezpośrednio do oprogramowania symulacyjnego sprawia, że są one łatwo dostępne dla zainteresowanych.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne. Poniżej wymieniam ponownie kilka uwag krytycznych lub dyskusyjnych, które umieszczono uprzednio w punkcie 1. recenzji:

- a. Niektóre sekcje przeglądu literatury mogłyby być rozszerzone, aby dostarczyć więcej informacji. Na przykład Autor mógłby podać więcej szczegółów na temat systemów poprawy jakości energii i ich funkcjonowania. Dodatkowo, choć Autor wspomina o stosowaniu sztucznych sieci neuronowych i metod uczenia się głębokiego w dziedzinie modelowania EAF, mógłby przedstawić więcej przykładów ich zastosowania i skuteczności,
- b. Możliwym błędem wnioskowania w rozdziale 4 jest założenie, że najlepiej dopasowany model oparty na określonej kombinacji systemu chaotycznego i współczynnika K_f dokładnie odzwierciedla fizykę systemu EAF. Wyniki mogą nie być reprezentatywne dla innych zbiorów danych lub systemów EAF i dlatego uogólnienie wyników musi być dokonywane z ostrożnością. Wreszcie, nie jest jasne, w jaki sposób proces optymalizacji zmiennych decyzyjnych wpływa na ogólną wydajność modelu,

- c. W rozdziale 5. nie omówiono krytycznie problemu nadmiernej generalizacji lub nadmiernego uproszczenia dokładności modeli ANN oraz przyjęto nieuzasadnione założenie, że wszystkie zjawiska EAF można modelować za pomocą ANN. Ponadto, nie omawia się ograniczeń modeli ANN ani potencjalnych kompromisów między dokładnością a złożonością modelu,
- d. W p. 5.1.2. nie uwzględniono zagrożenia zbyt dużego uproszczenia złożoności modelowania EAF i przyjęto założenie, że sieci LSTM są jedynym rozwiązaniem dla dokładnego modelowania. W tekście nie omówiono również potencjalnych ograniczeń i kompromisów między dokładnością a interpretowalnością wynikającymi z użycia metod uczenia głębokiego,
- e. W rozdziale 8. jest kilka niejasnych zdań, takich jak *"The results provided in the following subsections arise from the calculation of the expected resistance computed by the MODELS language solver"*. Ponadto stwierdzono, że *"It is related to the simplifying assumptions that the single-phase arc can exist independently from the remaining EAF phase 1"*, co jest mylące, ponieważ jednocześnie stwierdzono, że to założenie nie jest prawdziwe w rzeczywistym urządzeniu trójfazowym, gdzie uzwojenia wtórne transformatora są połączone w konfiguracji delta, gdzie pojedynczy łuk fazowy nie może istnieć.
- f. Cenne byłoby bardziej szczegółowe omówienie znaczenia wyników, w tym, w jaki sposób mogą one znaleźć konkretne zastosowanie w przemyśle.

4. Uwagi natury redakcyjnej Praca jest zredagowana bardzo starannie - choć partiami zbyt skrótowo a recenzent nie zauważył istotnych uchybień edycyjnych. Praca zawiera dużą liczbę ilustracji i tabel oraz kod programu w załączniku, co bardzo ułatwia analizę otrzymanych rezultatów. Mniej istotne usterki pomijam.

5. Wniosek końcowy Podsumowując stwierdzam, że Doktorant dowiódł postawionej tezy a Jego rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazała wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Macieja Klimasa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artyku 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U.2022.574 t.j. akt obowiązujący, wersja od 15 lutego 2023 r. do 30 kwietnia 2023 r.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

6. Wniosek o wyróżnienie rozprawy: Biorąc pod uwagę wysoce pozytywną recenzję rozprawy, wysoką wartość merytoryczną rozprawy oraz opublikowanie części wyników rozprawy w formie pracy oryginalnej w recenzowanym czasopiśmie naukowym, mającym Impact factor ([39] M. Klimas and D. Grabowski, "Application of shallow neural networks in electric arc furnace modeling," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 58, no. 5, pp. 6814–6823, 2022., 140 p. IF=4,079, CiteScore=8,9), w której Kandydat ubiegający się o stopień doktora jest głównym autorem przedmiotowej publikacji, na podstawie Uchwały Senatu Politechniki Śląskiej nr 126/2019 z dnia 16 grudnia 2019, § 14 p. 1 i 2, składam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Macieja Klimasa.

Kierownik
Katedry Elektrotechniki

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
KATEDRA PODSTAW ELEKTROTECHNIKI
I ELEKTROTECHNOLOGII
(K38W05D02)
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. 71 320 28 59, fax 71 322 97 25
NIP 8960005851 (1)