

Wrocław, 2021-01-04

dr hab. inż. Robert Lis, prof. uczelni

Katedra Energoelektryki

Politechniki Wrocławskiej

mail: robert.lis@pwr.edu.pl

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Wermińskiego
pt.: "Zdecentralizowany system zarządzania zapotrzebowaniem
na energię elektryczną do przesuwania obciążeń szczytowych
oraz poprawy stabilności dynamicznej systemu elektroenergetycznego".**

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Grzegorz Benysek.

*Recenzja została wykonana na podstawie umowy z dnia 06.11.2020r. z Prorektorem ds.
Nauki i Współpracy z Zagranicą Uniwersytetu Zielonogórskiego dr hab. inż. Marcinem
Mrugalskim, prof. uczelni.*

CEL ROZPRAWY

Częstotliwość w systemie elektroenergetycznym jest ściśle związana z bilansem mocy czynnej. W stanie ustalonym moc generowana w elektrowniach jest równa mocy pobieranej przez użytkowników plus straty przesyłowe. Wirniki generatorów obracają się wówczas ze stałą prędkością kątową i jeśli w systemie nie występuje deficyt mocy czynnej, to częstotliwość w stanie ustalonym równa jest częstotliwości znamionowej f_N .

W izolowanych systemach elektroenergetycznych regulacja częstotliwości realizowana jest przez zespół urządzeń tego samego rodzaju, niezależnie od sposobu połączenia jego poszczególnych składowych elementów, które można przedstawić za pomocą jednego zastępczego zespołu o charakterystykach równoważnych. Dotyczy to tak źródeł jak i odbiorów. Ponieważ impedancja sieci przesyłowej ma wyraźny charakter indukcyjny, można pominąć tu straty przesyłowe i cały system zastąpić jedną turbiną połączoną z generatorem, zasilającym jeden odbiór zastępczy. Charakterystyki statyczne oraz dynamiczne wytwarzania i odbioru

systemu będą charakterystykami zastępczej turbiny i zastępczego odbioru. Będą się zmieniać w ciągu doby, sezonu, lat, zależnie od zmiany układu zastępowanych urządzeń, ich liczby oraz warunków pracy. Regulacja pierwotna polega na zmianach mocy wytwarzanej zgodnie ze statyczną charakterystyką wytwarzania mocy danego zespołu, dokonywanych przez regulator prędkości obrotowej turbiny. W stanie ustalonym moc wytwarzana jest równa mocy odbieranej przy częstotliwości znamionowej. Jeśli nastąpi wzrost mocy odbioru o P_L , to od razu zmieni się moc generatora P_G tak, aby pokryć zmianę zapotrzebowania mocy w systemie. To spowoduje z kolei zmianę częstotliwości i w konsekwencji zmianę energii kinetycznej wirnika. Zmiana częstotliwości wymusi jednocześnie zmianę mocy odbioru P_{Lf} stosownie do charakterystyki częstotliwościowej odbioru. Nagły wzrost zapotrzebowania mocy lub utrata generacji powoduje więc wystąpienie pewnego stanu nieustalonego elektromechanicznego.

W stanie elektromechanicznym nieustalonym systemu elektroenergetycznego, np. przy nagłej utracie generacji, różnicę między mocą mechaniczną dołączoną do generatorów i mocą elektryczną oddawaną przez generatory do sieci, pokrywa moc pochodząca z energii kinetycznej zmagazynowanej w wirujących masach wirników. Prowadzi to do zmiany obrotów wirnika tak długo, dopóki nie nastąpi ustalenie nowego stanu równowagi. W nowym punkcie równowagi może wystąpić odchylenie częstotliwości od wartości zadanej. Przy dużych awariach objawiających się relatywnie dużym deficytem mocy czynnej, proces utraty równowagi częstotliwości odbywa się tak szybko, że układy regulacji turbin nie są w stanie zareagować. Konieczne jest automatyczne przeciwdziałanie poprzez ograniczenie mocy pobieranej w systemie. Czynią to układy samoczynnego częstotliwościowego odciążania (SCO), które stanowią ostatni środek obrony SEE przed rozległą awarią. Dominują tradycyjne rozwiązania SCO, których działania bazują na kryterium podczęstotliwościowym poszczególnych stopni odciążania. Obecne wymagania dla SCO zawarte w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej wynikają z wymagań określonych przez organizację Europejskiej Sieci Operatorów Elektroenergetycznych Systemów Przesyłowych ENTSO-E, opisanych w dokumencie Politycy 5 "Emergency Operations". Dokument ten określa założenia działania i odpowiedzialność operatorów systemów przesyłowych (OSP) w zakresie opanowywania zakłóceń dotyczących całego połączonego systemu europejskiego lub regionów.

Tradycyjne rozwiązania układów SCO stosowane są w celu szybkiego przywrócenia równowagi mocy w warunkach utraty stabilności częstotliwości, spowodowanej znacznym niebilansowaniem mocy w danym wydzielonym układzie stanowiącym podsystem lub wyspę. W połączonych systemach elektroenergetycznych przypadki utraty równowagi częstotliwości są bardzo rzadkie i jak wynika z analiz awarii światowych stanowią przyczynę ok. 25-30% wszystkich rozległych awarii. W 75% przypadków wystąpienia awarii systemowych ich przyczyną jest utrata równowagi napięciowej. Utrata równowagi częstotliwości np. w połączonym europejskim systemie elektroenergetycznych jest mało prawdopodobna, gdyż wiązałaby się z nagłym deficytem przekraczającym ok. 30 000 MW. Natomiast takie zjawisko może mieć miejsce przy wydzieleniu się niebilansowanego podsystemu lub wyspy. Przykładem jest awaria z 2006 r., gdzie system europejski rozdzielił się na trzy podsystemy, w tym dwa z deficytem mocy a jeden z nadwyżką.

Analiza i badanie właściwości opracowanego rozproszonego systemu sterowania obciążeniem o nazwie DADR jest przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej. System DADR wspomaga utrzymanie równowagi częstotliwościowej systemu elektroenergetycznego poprzez oddziaływanie na jego stronę popytową i redukcje obciążeń szczytowych. Porusza ważne problemy dotyczące spodziewanej skuteczności działania tradycyjnych układów SCO stosowanych w SEE, konieczności analizy populacji SCO oraz potrzeby przeprowadzenia weryfikacji stosowanych aparatów. Zatem recenzowana rozprawa mieści się w nurcie bardzo ważnych badań naukowych o praktycznym znaczeniu, mających na celu poprawę bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego. W pracy brakuje dyskusji nt. istotnej kwestii w planowaniu pracy SCO/DADR jaką jest właściwy dobór miejsc wyłączania odbiorców w sieci SN/nN. Brak uwzględnienia obecności źródeł OZE/GR może przyczynić się do pogłębiania deficytu między wytwarzaniem i poborem mocy czynnej.

TEZA ROZPRAWY

Z krytycznego przeglądu literatury doktorant wyciąga wnioski, że istnieje potrzeba opracowania rozproszonego rozwiązania sprzętowego, pozwalającego na odciążenie systemu elektroenergetycznego po stronie popytowej w sposób nie powodujący kołysań i skoków mocy

czynnej, przyczyniającego się do utrzymania równowagi częstotliwościowej i redukcje obciążeń szczytowych.

Doktorant stawia następującą tezę:

Zarządzanie zapotrzebowaniem na energię elektryczną pozwala na poprawę stabilności dynamicznej oraz przesuwanie obciążeń szczytowych bez negatywnego oddziaływania na pracę systemu elektroenergetycznego.

Moim zdaniem, udowodnienie tezy może mieć znaczenie praktyczne dla obrony sieci przesyłowej przed wystąpieniem lawiny częstotliwości w obszarach systemu elektroenergetycznego z deficytem mocy czynnej. Doktorant ograniczył zakres pracy do analizy rozwiązań wspierających istniejące środki do utrzymania równowagi częstotliwościowej poprzez zmianę bilansu mocy czynnej po stronie popytowej systemu. Wolałbym, aby doktorant w tezie nie powoływał się na określenie stabilności dynamicznej, które w rozprawie zostało ograniczone do stabilności częstotliwościowej.

Dowód tezy przeprowadził doktorant w kilku rozdziałach i podrozdziałach rozprawy.

W rozdziale 3 przedstawił założenia zdecentralizowanego systemu redukcji obciążenia DADR obejmujące:

- charakterystykę badanego wybranego obszaru sieci elektroenergetycznej, pracującej synchronicznie,
- cechy charakterystyczne systemu DADR: rozproszenie elementów wykonawczych (gniazd AGP), brak wzajemnej komunikacji i nadrzędnego sterownika, brak konieczności ingerencji w konstrukcję sterowanych odbiorników,
- opis opracowanego prototypu urządzenia: aktywnego gniazda pośredniczącego (AGP),
- opisy zaimplementowanych oryginalnych probabilistycznych algorytmów sterowania aktywnego gniazda pośredniczącego, które wariantowo dedykowane są do wspierania procesu szybkiego przywracania równowagi mocy czynnej w warunkach utraty stabilności częstotliwości oraz do redukcji obciążeń szczytowych. Algorytmy ukierunkowane są na przypadki zapadów częstotliwości.

W rozdziale 2 autor omówił wybrane zagadnienia utrzymania stabilności częstotliwościowej połączonych SEE ze wskazaniem zalet i wad. Powołując się na liczne akty prawne UE [6-10], przedstawił wady koordynacji usług systemowych, które dotyczą organicznej przepustowości interkonektorów oraz ograniczonej dynamiki zmian mocy wymiany międzysystemowej.

W rozdziale 3 dodatkowo został opisany zdecentralizowany system do zarządzania zapotrzebowaniem na energię elektryczną (tzw. system DADR z gniazdem AGP). Doktorant dokonał także podziału typów odbiorników ze względu na możliwość ich wykorzystania w działaniach redukcyjnych obciążenie. Przedstawiono wyniki symulacji, które ilustrują różnice w działaniu algorytmów sterowania deterministycznego i stochastycznego, zaimplementowanych w AGP.

W rozdziale czwartym omówiono uproszczony model sieci sztywnej jednogeneratorowej, na podstawie którego przeprowadzono symulacje działania systemu DADR w zakresie poprawy stabilności częstotliwościowej. W małym stopniu wykazano, że w żadnym z analizowanych przypadków nie zostały pogorszone parametry dynamicznej regulacji częstotliwości.

W 5 rozdziale doktorant opisał model eksperymentalny, na podstawie którego przeprowadzono badania w układzie otwartym i zamkniętym. Przedstawiono i omówiono wyniki eksperymentu na stanowisku badawczym, które składało się z matrycy ok 900 szt. urządzeń AGP. Doktorant wykazał, że decydującym środkiem technicznym poprawy niezawodności jest zamiana awaryjnych odcinków linii napowietrznych liniami kablowymi.

W rozdziale 6 przedstawił uwagi i wnioski końcowe wskazujące na udowodnienie postawionej tezy. Na końcu przedstawiono dalsze kierunki badań.

Praca zawiera bogaty przegląd literatury (161 pozycji), wskazujący na dogłębne rozpoznanie prac innych autorów zajmujących się podobną problematyką na świecie i w kraju.

WYKAZANIE POPRAWNOŚCI TEZY

Doktorant w rozprawie wykazał metodami symulacyjnymi i eksperymentalnymi, że proponowany przez niego autorski system i algorytm może być wykorzystany i stosowany do poprawy niezawodności pracy wybranych obszarów SEE (w sensie wystarczalności) poprzez redukcję obciążeń szczytowych i zwiększenie rezerwy mocy czynnej poprzez obniżenie

obciążenia sterowanych odbiorników, co może przyczynić się do poprawy warunków równowagi częstotliwościowej szczególnie w izolowanej sieci przesyłowej.

Problematyka rozprawy doktorskiej ma istotne znaczenie praktyczne dla krajowej elektroenergetyki w zakresie sterowania obciążeniami po stronie popytowej oraz marginalne znaczenie w zakresie regulacji częstotliwości w połączonych synchronicznie systemach elektroenergetycznych.

Za oryginalny wkład doktoranta uważam:

- opracowanie prototypu systemu automatyki rozproszonej typu DADR,
- opracowanie deterministycznego i probabilistycznego algorytmu do redukcji obciążeń szczytowych,
- opracowanie stochastycznego algorytmu, umożliwiającego grupowe sterowanie odbiornikami bez powodowania nagłych skoków i kołysań mocy,
- przeprowadzenie weryfikacji zaproponowanych algorytmów na modelu eksperymentalnym, składającym się z około 900 gniazd AGP.

Rozprawa jest oryginalna w dyscyplinie naukowej Automatyka, elektronika i elektrotechnika.

UWAGI

Uwagi odnoszą się do niektórych etapów analizy i poprawy niezawodności prowadzonych według autorskiego algorytmu.

- 1) W połączonych systemach elektroenergetycznych przypadki utraty równowagi częstotliwości są bardzo rzadkie. Obniżenie częstotliwości poniżej predefiniowanego progu powoduje uruchomienie automatyki LFSM-U (ang. *Limited Frequency Sensitive Mode – Underfrequency*), które powinno skutkować od strony technicznej jak najszybszą zmianą obciążenia jednostki wytwórczej, zgodnie z charakterystyką statyczną. Jeżeli wspólne działanie jednostek wytwórczych w reakcji na zakłócenie okaże się niewystarczające, nie powstrzyma dalszej zmiany częstotliwości i w konsekwencji doprowadzi do podziału systemu, to mogą zostać pobudzone zdefiniowane przez operatora SEE warunki przejścia jednostki do pracy wyspowej. Po aktywacji LFSM bez przejścia do pracy wyspowej, należy się liczyć z faktem, że po opanowaniu zakłócenia

charakter odpowiedzi mocowej (dynamika, zdolność do utrzymania zmiany obciążenia) może być gorszy od tego jaki byłby w przypadku pracy układów regulacji jednostki wytwórczej w warunkach pracy wyspowej. W rozprawie brak jest pogłębionej informacji na ten temat.

- 2) Czytelnika zaskakuje na stronie 18 stwierdzenie, że *"Chociaż działania takie zwiększają znacznie bezpieczeństwo i stabilność systemów krajowych to posiadają także wady związane z ograniczoną przepustowością interlokutorów a także ograniczoną dynamiką zmian mocy wymiany międzysystemowej [6, 7, 8, 9, 10]"*. Co uprawnia Autora do zredagowania takiego wniosku? Z zacytowanych rozporządzeń UE jest to mało prawdopodobne?
- 3) Zasadniczą wadą rozprawy doktorskiej jest brak definicji pojęć, którymi posługuje się Autor. Szczególny brak definicji odczuwa się w przypadku często używanego w rozprawie pojęcia regulacji i sterowania. Czym różni się sterowanie od regulacji? Za każdym razem są odmiennie rozumiane. Brakuje także definicji pojęcia stabilności dynamicznej SEE, które zostało użyte w tytule i tezie pracy.
- 4) Nie rozumiem wniosków podanych w pkt. 2.3.5 Podsumowanie. Na stronie 35 Autor stwierdza np.: *„relatywnie mała szybkość zmiany mocy znamionowej istniejących źródeł wytwórczych”*. Co Autor ma na myśli?
- 5) Na stronie 36 Autor pisze *"... polski OSP wprowadził programy taryfowe i bodźcowe mające na celu redukcje zapotrzebowania na polecenie OSP, polegającej na zmniejszeniu poboru mocy przez odbiorców energii elektrycznej w wybranych godzinach. Działania te mają skutek zarówno w aspekcie poprawy bezpieczeństwa związanego ze stabilnością częstotliwościową jak i pokryciem zapotrzebowania na moc w czasie godzin szczytowych."* Czy Autor przewiduje możliwość skoordynowanego uczestniczenia w ww. programach z systemem DADR?
- 6) Błędem jest stwierdzenie *„...tzw. wirującej rezerwy mocy”* na str. 42. Czy Autor mówiąc *"wirującej"* ma na myśli *„wirtualnej"*. Proszę Doktoranta o wyjaśnienie pojęcia *„negawat”* - jednostki poszanowania energii.

- 7) W tradycyjnym podejściu do redukcji obciążenia, kiedy częstotliwość jest niższa od nastawionego pierwszego stopnia pobudzenia (od strefy nieczułości w systemie DADR), następuje z ustalonym prawdopodobieństwem pobudzenie pierwszej grupy urządzeń AGP z sumaryczną mocą czynną P_{rAGP} , a po czasie działania (suma czasu własnego przekaźnika + czas zwłoki układów pośredniczących + czas działania wyłącznika) następuje odciążenie pierwszego stopnia. Ponieważ w trakcie zwłoki czasowej częstotliwość może nadal opadać, to wyłączenie obciążenia następuje przy odpowiednio niższej częstotliwości niż nastawiona. Jeśli szybkość obniżania się częstotliwości jest odpowiednio duża, to zanim nastąpi odciążenie przez pierwszej grupy urządzeń sterowanych przez AGP, może nastąpić pobudzenie drugiego stopnia. Ze względu na zwłokę działania odciążenie przez ten stopień może już nastąpić przy odbudowywaniu się częstotliwości, co może spowodować nadkrytyczny przebieg odbudowy częstotliwości. W jaki sposób można uniknąć ww. wady w rozwiązaniu proponowanym przez doktoranta?
- 8) Jak powyżej zasygnalizowano, warunki działania aktywnego gniazda pośredniczącego AGP mogą być bardzo trudne. Czy w ramach przeprowadzonego eksperymentu odnotowano przypadki działań zbędnych systemu DADR, powodowanych występowaniem różnego rodzaju stanów przejściowych w sieci rozdzielczej nN? Działania zbędne mogą być przyczyną pozbawiania odbiorców zasilania i każą się zastanowić nad poprawnością stosowanych metod pomiarowych i algorytmów. Jeśli występują działania zbędne, to równie dobrze mogą wystąpić działania brakujące. Może to świadczyć zarówno o niedoskonałości zastosowanych algorytmów i metod pomiarowych jak i niewłaściwej implementacji. Opisany w rozprawie algorytm przewiduje ponowne załączenie odbiornika po ustalonym czasie t_{action} bez sprawdzenia aktualnego stanu pracy SEE co może spowodować nadkrytyczny przebieg odbudowy lub pogłębiania się lawiny częstotliwości. Trudno zatem czytelnikowi wyrobić sobie pogląd o poprawności działania autorskiego algorytmu do wspomaganie dynamicznej stabilności częstotliwościowej zaprezentowanych w rozprawie.
- 9) Cechą odróżniającą układ pomiarowy w systemie DADR od innych aparatów EAZ jest fakt, że pomiar częstotliwości odbywa się w sposób pośredni. Układ pomiarowy korzysta

z napięć fazowych lub międzyfazowych. Zatem nie bez znaczenia jest przyjęty wybór napięć (fazowe lub skojarzone), algorytm pomiarowy oraz rodzaj filtracji częstotliwości podstawowej. Przebiegi napięć w warunkach utraty równowagi częstotliwości odkształcone są nie tylko ze względu na harmoniczne, ale również na występujące kołysania między jednostkami wytwórczymi oraz często również przez takie zjawiska jak ferorezonansy i przepięcia. Również miejsce pomiaru jest nie bez znaczenia. Przy dzisiejszym rozwoju techniki pomiar częstotliwości może być realizowany po stronie nN. Proszę przedstawić rachunek błędów i porównać wartość błędu bezwzględnego wartości uchybu częstotliwości Δf z wartością strefy nieczułości systemu DADR Δf_{ϵ} . Czy doktorant dokonał założenia stałości parametrów w zależności od wartości i kształtu napięcia pomiarowego i brak podatności na odkształcenia napięcia i częstotliwości?

- 10) Wartość strefy nieczułości Δf_{ϵ} przyjmuje różne wartości w prezentowanej pracy: na str. 102 rozprawy ta zmienna przyjmuje wartość 0,03Hz, zaś na str. 111 przyjęto $\Delta f_{\epsilon}=0,05\text{Hz}$. Nie jest jasny dla mnie sposób wyboru wartości Δf_{ϵ} . Jaki to ma wpływ na interpretację wyników symulacji i eksperymentu?
- 11) Mankamentem rozprawy są liczne błędy edycyjne, np., pominięcie na stronie 11 w "Akronimy" wielu pojęć występujących w tekście rozprawy. Przykładowo, na stronie 38 symbole JWCD i nJWCD. Na stronie 37 pominięto odnośnik bibliograficzny. Na stronie 48 Autor błędnie używa stwierdzenia „w punkcie przyłącza”. Str. 50 „... ilość wejść/wyjść” jest zapisem błędnym. Na stronie 18: „...wady związane z organiczną przepustowością interkonektorów...”. Drobne błędy edycyjne, np. literówki, błędy stylistyczne utrudniają czytanie pracy.

Powyższe uwagi merytoryczne nie umniejszają osiągnięć doktoranta. Uważam, że osiągnięcia te są znaczące, merytorycznie poprawne i inspirujące do dalszych badań.

Mimo powyższych uwag uważam, że poprawny jest jeden autorski algorytm oraz prototyp urządzenia jest dobrze udokumentowany.

Rozprawa doktorska jest przejrzysto zredagowana.

Materiał ilustracyjny jest również dobrze dobrany i przekonujący.

RECENZJA rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Wermińskiego pt. "Zdecentralizowany system zarządzania zapotrzebowaniem na energię elektryczną do przesuwania obciążeń szczytowych oraz poprawy stabilności dynamicznej systemu elektroenergetycznego"

WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy bardzo ważnego i trudnego zagadnienia poprawy wystarczalności pracy systemu elektroenergetycznego za pomocą nowatorskich środków technicznych.

Uważam, że doktorant rozwiązując postawione sobie zadanie wykazał się dużą praktyczną wiedzą z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach i tytułach naukowych i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Szymona Wermińskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

dr hab. inż. Robert Lis, prof. uczelni

