

Załącznik 3A

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych
(po uzyskaniu stopnia doktora)
w języku polskim

1. Imię i nazwisko:

Robert Małkowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania:

- **Stopień naukowy doktora nauk technicznych** w zakresie elektrotechniki;
Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej;
Temat rozprawy: *Nowe algorytmy działania automatyki samoczynnego częstotliwościowego odciążana (SCO) w systemie elektroenergetycznym*;
Promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard Zajczyk;
Recenzenci: prof. dr hab. inż. Zbigniew Szczerba,
prof. dr hab. inż. Paweł Sowa;
Rok uzyskania: 2003;
- **Kurs Pedagogiczny**, Politechnika Gdańska 2006 r.
- **Tytuł magistra inżyniera**;
Kierunek: Elektrotechnika; Specjalność: Systemy elektroenergetyczne;
Temat pracy dyplomowej: *Wpływ zwarć na pracę układów przesyłowych z liniami prądu stałego*
Recenzenci: prof. dr hab. inż. Ryszard Zajczyk (promotor);
prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubośny
Rok uzyskania: 1999;

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

Okres zatrudnienia	Pracodawca/ Stanowisko / funkcja
od 01.09.2016 r.	Politechnika Gdańska WEiA / z.ca Kierownika laboratorium LINTE ² ds. badań naukowych.
od 01.08.2016 r.	Politechnika Gdańska WEiA / starszy wykładowca
od 01.09.2010 do 31.12.2015	Politechnika Gdańska WEiA / specjalista inżynierijno-techniczny / Koordynator naukowo-techniczny (elektroenergetyka) – projekt LINTE ² .
od 01.08.2003 r do 30.07.2016 r	Politechnika Gdańska WEiA / adiunkt
od 15.07.1999 r. do 31.07.2003	Politechnika Gdańska WEiA / stanowisko asystent

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

A. Tytuł osiągnięcia naukowego

Monografia pt. *Transformatory z regulacją przekładni pod obciążeniem w systemie elektroenergetycznym – zagadnienia wybrane*

B. Autor, tytuł publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci:

Malkowski R.: *Transformatory z regulacją przekładni pod obciążeniem w systemie elektroenergetycznym – zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2019, Cykl: Monografie 182, (ISBN 978-83-7348-778-9), 196 stron.

Recenzenci: dr hab. inż. Piotr Miller, prof. nadzw. Politechnik Lubelskiej;
dr hab. inż. Jarosław Guziński, prof. nadzw. Politechnik Gdańskiej;

C. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Monografia *Transformatory z możliwością regulacji przekładni pod obciążeniem w systemie elektroenergetycznym – zagadnienia wybrane* stanowi podsumowanie ważnego obszaru moich wieloletnich prac związanych z szeroko pojętym bezpieczeństwem systemu elektroenergetycznego. Zawarto w niej syntetyczne ujęcie problematyki wykorzystania transformatorów z regulacją przekładni pod obciążeniem w procesach regulacji napięcia i mocy biernej w systemie elektroenergetycznym (SEE). Aktualność i znaczenie tej tematyki wynika między innymi ze wzrastającego udziału w SEE odnawialnych i rozproszonych źródeł energii, a także z rosnącego obciążenia systemu urządzeniami klimatyzacyjnymi i przewidywanego wzrostu obciążenia stanowiskami ładowania pojazdów elektrycznych. Wzrastająca liczba i moc powyższych urządzeń bardzo utrudnia spełnienie rosnących wymagań dotyczących jakości energii i pewności jej dostawy. Istotnym sposobem zapobiegania negatywnemu wpływowi tych urządzeń na jakość pracy systemu jest zwiększanie możliwości regulacyjnych systemu.

Jednym z kierunków tych działań może być szersze niż dotychczas wykorzystanie transformatorów energetycznych z regulacją przekładni pod obciążeniem w procesach regulacji napięcia i mocy biernej w SEE. Takie zastosowanie transformatorów wymaga rewizji konwencjonalnych algorytmów regulacji przekładni transformatorów w poszczególnych węzłach systemu. Omawiana praca poświęcona jest wielostronnej dyskusji na temat tego zagadnienia.

Głównym celem badań przedstawionych w monografii jest: wyjaśnienie i opisanie wpływu zmiany przekładni transformatora blokowego na obszar dopuszczalnych stanów pracy generatora oraz układu generator-transformator blokowy, wpływu zmiany przekładni transformatora w stacji GPZ na możliwość powstania lawiny napięcia oraz przedstawienie autorskich sposobów pracy transformatorów zwiększających bezpieczeństwo napięciowe systemu elektroenergetycznego.

We wstępnej części pracy zaproponowano syntetyczny i usystematyzowany opis modeli matematycznych transformatorów, które są wykorzystywane w badaniach symulacyjnych procesów regulacyjnych napięcia i mocy biernej w SEE. Przedyskutowano wybrane typy modeli obwodowych transformatorów i autotransformatorów dwu- i trójzwojowych, które uwzględniają różny poziom

założeń upraszczających. Zestawiono, w układzie wzorowanym na strukturze systemu elektroenergetycznego, stosowane w KSE algorytmy regulacji transformatorów z podobciążeniowym przełącznikiem zaczepów. Dla każdego rozważanego przypadku przedyskutowano podstawy teoretyczne, uwarunkowania techniczne oraz aktualny stan praktyki inżynierskiej w zakresie stosowanych algorytmów regulacji i nastaw.

Dokonano rewizji stosowanych w KSE algorytmów działania układów regulacji nadrzędnej węzła wytwórczego typu ARNE oraz układów regulacji nadrzędnej stacji przesyłowych typu ARST. Przeanalizowano typowe funkcjonalności tych układów oraz przykłady koordynacji działania poszczególnych transformatorów w obrębie jednej stacji, a dla układów ARST – koordynacji transformatorów w stacjach sąsiednich, jak również koordynacji z układami regulacji farm wiatrowych przyłączonych do sieci najwyższych napięć. Wskazano ponadto na potencjalne korzyści wynikające z wykorzystania innych niż farmy wiatrowe źródeł mocy biernej, np. lokalnych elektrociepłowni oraz wielkich odbiorców.

Zaprezentowane w monografii, stosowane obecnie w KSE i na świecie, rozwiązania są punktem odniesienia dla przedstawionych autorskich algorytmów sterowania pracą transformatorów wyposażonych w podobciążeniowy przełącznik zaczepów.

Proponowane rozwiązania dotyczą po pierwsze sposobu działania transformatora blokowego zwiększającego zakres regulacyjny mocy biernej generatora w sytuacji znacznego deficytu lub nadmiaru mocy biernej w systemie [2], po drugie sposobu działania transformatora dystrybucyjnego w sytuacji sprzyjającej powstaniu lawiny napięcia [3]. Obie propozycje zostały wszechstronnie zweryfikowane za pomocą badań symulacyjnych oraz testów z wykorzystaniem modeli fizycznych laboratorium LINTE². Obie propozycje objęte są również ochroną patentową: pierwsza na podstawie zgłoszenia patentowego o numerze P.429389 z 26.03.2019 r., druga na podstawie udzielonego patentu o numerze PL 217312 z 31.07.2014 r.

Jeszcze kilkanaście lat temu żaden z transformatorów blokowych zainstalowanych w KSE nie umożliwiał zmiany przekładni pod obciążeniem. Od 2008 r. zgodnie z zapisami zawartymi w IRiESP nowo budowane i modernizowane bloki sukcesywnie są wyposażane w transformatory z podobciążeniowymi przełącznikami zaczepów. Aktualnie w całym KSE takich jednostek jest ok. 30. Jak wykazano w monografii [1] oraz w opracowaniach [6, 7], właściwe wykorzystanie transformatora blokowego z podobciążeniowym przełącznikiem zaczepów może pozytywnie wpłynąć zarówno na możliwości regulacyjne bloku wytwórczego, jak i na proces regulacji napięcia w węźle wytwórczym. W latach 2007–2008, pracując w zespole kierowanym przez prof. Zbigniewa Szczerbę, realizowałem prace związane z problematyką koordynacji działania regulatora transformatora blokowego i regulatora napięcia generatora. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych zostały przedstawione między innymi w pracach [4, 5]. Na potrzeby monografii [1] rozszerzono zakres wspomnianych badań, między innymi o badania z wykorzystaniem modeli fizycznych w laboratorium LINTE². Model fizyczny wykorzystanej w testach jednostki wytwórczej składał się z generatora synchronicznego wyposażonego w statyczny tyrystorowy układ wzbudzenia oraz transformatora blokowego z energoelektronicznym przełącznikiem zaczepów. Generator synchroniczny napędzany był przez silnik asynchroniczny klatkowy, który wraz z energoelektronicznym przemiennikiem częstotliwości emulował zachowanie turbiny cieplnej. Układy regulacji generatora, transformatora oraz turbiny wraz z modelem turbiny i kotła zaimplementowane zostały w komputerze przemysłowym sterującym opisaną jednostką wytwórczą. Należy nadmienić, że mój udział w opracowaniu założeń i w pracach związanych z powstaniem wspomnianego modelu fizycznego był znaczący (więcej informacji nt. laboratorium

LINTE² zawarto w rozdziale 5. autoreferatu oraz załączniku 2 monografii [1]). Wyniki badań zarówno symulacyjnych, jak i laboratoryjnych dały zbliżone rezultaty i pozwoliły ustalić najkorzystniejszy sposób koordynacji regulatorów generatora i transformatora. Rekomendowany sposób (opisany w monografii jako sposób 2B) zakłada, że regulator napięcia generatora utrzymuje zadaną wartość napięcia po stronie wtórnej transformatora blokowego, a regulator transformatora blokowego utrzymuje zadaną wartość napięcia generatora (strona pierwotna transformatora). Opisaną w pracy autorską propozycją sterowania pracą transformatora blokowego uwzględnia wskazany w monografii sposób koordynacji obu regulatorów.

Pomimo upływu lat tematyka podjęta w 2007 roku jest nadal bardzo aktualna, a analiza dostępnej literatury [7–11] oraz konsultacje przeprowadzone z twórcami układów ARNE wskazują, że w KSE wykorzystywanie potencjału regulacyjnego transformatora blokowego ogranicza się jedynie do stanu pracy normalnej. Podobne podejście obserwuje się również w innych systemach [12]. Nie ma aktualnie żadnych dodatkowych kryteriów uzależniających zmianę przekładni transformatora blokowego np. w sytuacji wyczerpania możliwości regulacyjnych generatora. Mając powyższe na uwadze, w monografii zaproponowano rozwiązanie polegające na zmianie przekładni transformatora blokowego w sytuacji wystąpienia deficytu lub nadmiaru mocy biernej w systemie w taki sposób, aby zwiększyć w sposób dynamiczny, dyspozycyjny zakres mocy biernej generatora.

W pracy [13] (Losi *et al.* 1998) zaprezentowano sposób pracy transformatora maksymalizujący zakres regulacyjny mocy biernej generatora. W rozwiązaniu tym numer zaczełu jest funkcją wartości napięcia bloku oraz kąta obciążenia wynikającego z aktualnej mocy bloku. Choć autorzy wykazują pozytywne efekty proponowanego rozwiązania, należy wskazać kilka jego istotnych wad:

- wartości kryterialne opracowywane są offline;
- konieczne jest dokładne modelowanie poszczególnych urządzeń i układów regulacji węzła wytwórczego, gdyż macierz przełączeń opracowywana jest na podstawie badań symulacyjnych;
- brak możliwości bezpośredniego zastosowania tego rozwiązania w przypadku przyjęcia rekomendowanego w monografii [1] sposobu koordynacji generatora i transformatora (według sposobu 2B);
- nie uwzględnia się rzeczywistego obciążenia generatora – wielkości kryterialne zmiany zaczełu obejmują wielkości mierzone po stronie górnej transformatora blokowego;
- założono stałą wartość mocy potrzeb własnych oraz stałość przekładni transformatora potrzeb własnych, jak również niezmiennosc mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia.

Wad tych nie mają propozycje przedstawione w monografii [1] i pokazane na rys. 1 poniżej. Stanowią one autorską metodę rozszerzającą kryteria koordynacji transformatora blokowego z regulatorem generatora. W proponowanej metodzie zmiana sposobu regulacji transformatora blokowego aktywowana jest sygnałem binarnym informującym o pobudzeniu dowolnego z ograniczników, odpowiednio:

- sygnał OPS_{ACT} informuje o pobudzeniu ogranicznika prądu stojana;
- sygnał OPW_{ACT} informuje o pobudzeniu ogranicznika prądu wzbudzenia;
- sygnał OKM_{ACT} informuje o pobudzeniu ogranicznika kąta mocy.

Sygnały te powinny być dostarczone do układu regulacji transformatora blokowego (może to być indywidualny regulator lub układ ARNE) z układu regulacji napięcia generatora. Wymóg ten do

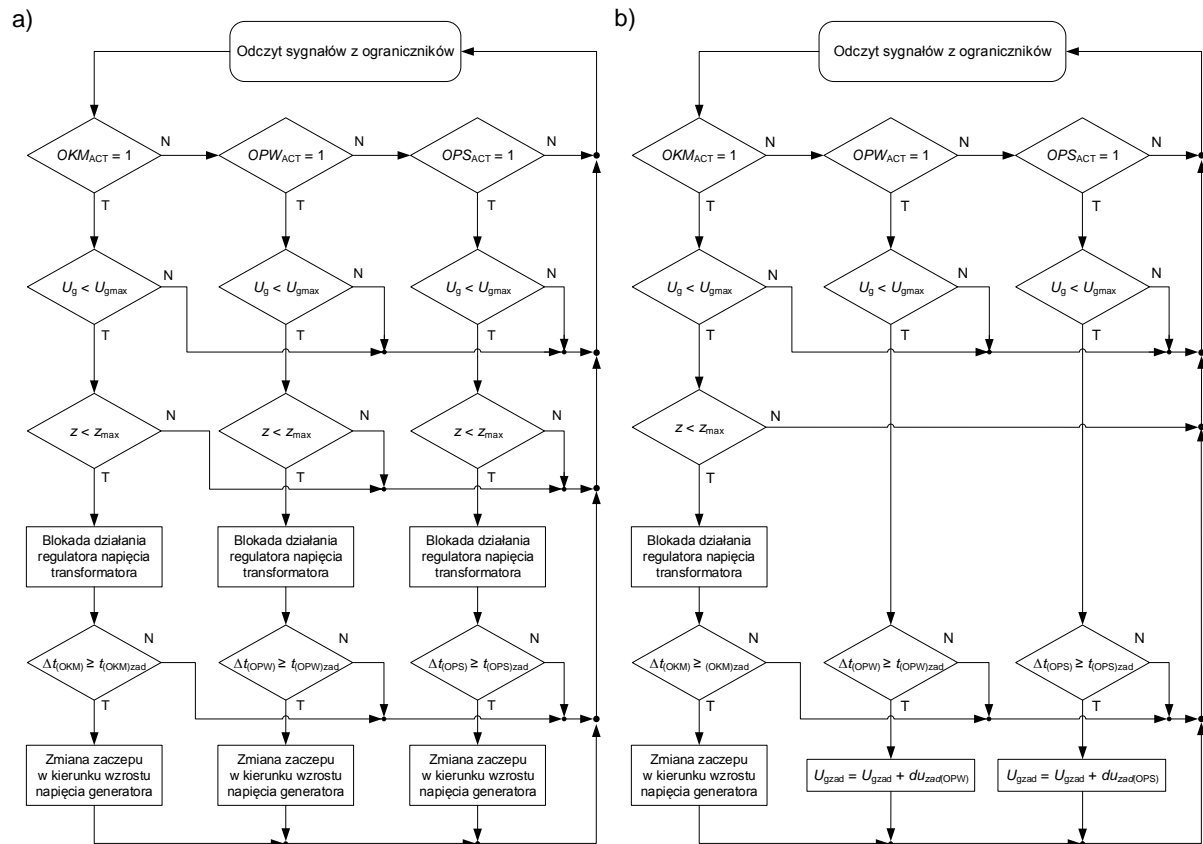
niedawna można byłoby uznać za wadę proponowanego rozwiązania. Konsultacje prowadzone z konstruktorami układów ARNE oraz układów regulacji napięcia generatora pozwalają jednak stwierdzić, że proponowane rozwiązanie jest możliwe do wdrożenia w stosowanych w KSE układach regulacji grupowej węzła wytwórczego. Obecnie w niektórych elektrowniach (np. Elektrownia Wodna Żarnowiec, Elektrownia Jaworzno II) istnieją rozwiązania, w których proces regulacji napięcia uzależniony jest od sygnałów informujących o pobudzeniu poszczególnych ograniczników lub informacji o zbliżeniu się do wartości granicznych determinujących zadziałanie wybranych ograniczników. Wykorzystany w badaniach symulacyjnych i testach sposób wyznaczania sygnałów opisują zależności (1):

$$OPS_{ACT} = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } I_g > I_{gmaxT} \\ 0 & \text{jeżeli } I_g \leq I_{gmaxT} \end{cases} \quad (1a)$$

$$OPW_{ACT} = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } I_f > I_{fmaxT} \\ 0 & \text{jeżeli } I_f \leq I_{fmaxT} \end{cases} \quad (1b)$$

$$OKM_{ACT} = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } Q_{progT}(P_g) > Q_{g(pu)} \\ 0 & \text{jeżeli } Q_{progT}(P_g) \leq Q_{g(pu)} \end{cases} \quad (1c)$$

gdzie I_{gmaxT} i I_{fmaxT} oznaczają wartości graniczne odpowiednio prądu generatora i prądu wzbudzenia powodujące aktywację działania proponowanych sposobów koordynacji, $Q_{progT}(P_g) = Q_{prog}(P_g) - dQ$, przy czym dQ definiuje parametr skutkujący przesunięciem krzywej (zawężenie obszaru) opisującej granicę $Q_{prog}(P_g)$ związaną z warunkiem dopuszczalnego kąta mocy.



Rys. 1. Uproszczony algorytm koordynacji regulatora transformatora blokowego i regulatora generatora w sytuacji, w której punkt pracy zbliża się do jednego z ograniczeń (W1, W2, W3): a) wariant 1, b) wariant 2; gdzie z_{max} – skrajna pozycja zaczeptu, t_{zad} – zadany czas opóźnienia przełączenia wynikający np. z potrzeby ustabilizowania wielkości pomiarowych po przełączeniu zaczeptu

W wariantcie 1 proponowanego sposobu koordynacji (rys. 1a) założono, że w sytuacji, w której dochodzi do pobudzenia jednego z ograniczeń (OPS_{ACT} , OPW_{ACT} lub OKM_{ATC}), następuje blokada działania regulatora transformatora (dezaktywacja regulacji napięcia generatora według kryterium napięcia dolnego) i przejście do bezpośredniego sterowania przełącznikiem zaczeów według kryterium numeru zaczeu. Rozwinięciem tej propozycji jest sposób koordynacji pokazany na rys. 1b. W tym rozwiązaniu dla przypadku pobudzenia ogranicznika prądu wzbudzenia lub ogranicznika prądu stojana regulacja napięcia według kryterium strony dolnej transformatora nie jest blokowana, a jedynie korygowana jest wartość zadana napięcia generatora. Ponieważ w regulatorze transformatora występuje strefa nieczułości oraz zależne od uchybu opóźnienie zmiany zaczeu, zmiana przekładni transformatora charakteryzuje się dużym opóźnieniem. Stąd też takie rozwiązanie może być wprowadzone jedynie w torach regulacji związanych z ogranicznikami prądowymi. Przekroczenie wartości prądów powoduje głównie skutki cieplne i dlatego dopuszcza się czasowe przekroczenie granicznych wartości prądów. Uchyb związany z działaniem ogranicznika kąta mocy powinien być likwidowany szybko, stąd też wprowadzanie dodatkowych opóźnień związanych z regulacją napięcia jest niepożądane.

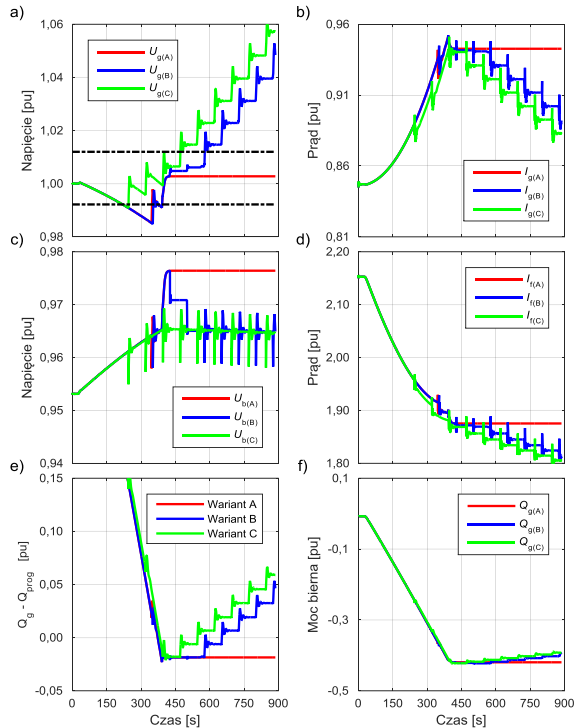
Niezależnie od przyjętego rozwiązania (wariant 1 lub 2 na rys. 1) kolejne zmiany zaczeu lub wartości zadanej napięcia następują po czasie nie krótszym niż wymagany do prawidłowej weryfikacji skuteczności sterowania. Odpowiednio są to czasy: $t_{(OKM)zad}$, $t_{(OPW)zad}$, $t_{(OPS)zad}$. Obejmują one między innymi czas własny przełączania zaczeów (tylko w modelu) oraz czas martwy związany z zanikiem stanów nieustalonych wywołanych zmianą przekładni. Zmiany zaczeów lub wartości zadanej napięcia następują tak długo, jak długo sygnały OKM_{ACT} , OPW_{ACT} , OPS_{ACT} mają stan wysoki, lub do czasu osiągnięcia granicznej wartości napięcia generatora bądź skrajnego zaczeu. Dezaktywacja blokady regulacji napięcia według kryterium napięcia dolnego (niepokazana na rys. 1) może być realizowana ręcznie lub automatycznie. Warunkiem powrotu do regulacji według kryterium napięcia dolnego w sposób automatyczny jest brak pobudzenia członów OKM_{ACT} , OPW_{ACT} , OPS_{ACT} . Przed dezaktywacją wartość zadana napięcia powinna przyjąć wartość równą aktualnej wartości napięcia przy jednoczesnym zachowaniu warunku $U_{gzad} \leq U_{gmax}$.

Pozytywne efekty zastosowania proponowanego rozwiązania pokazano na rys. 2 i rys. 3.

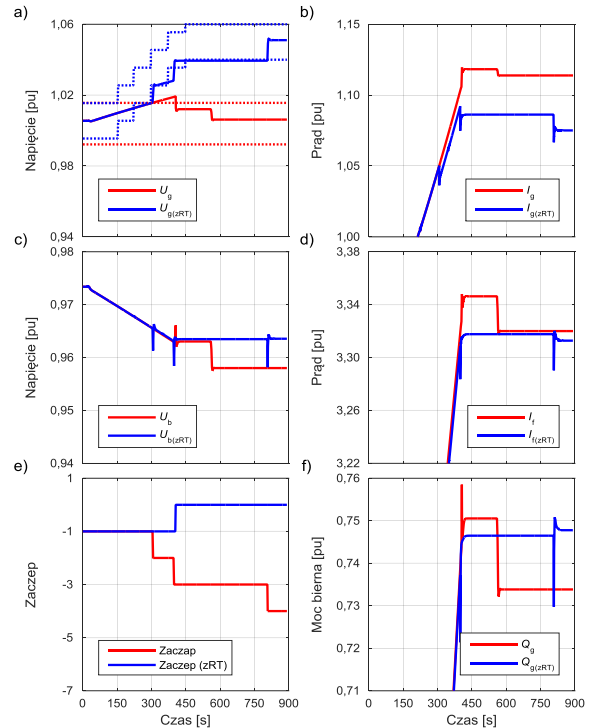
Na rys. 2. pokazano przypadek, w którym z powodu nadmiaru mocy biernej w SEE dochodzi do pobudzenia ogranicznika kąta mocy i zmiany sposobu działania transformatora blokowego ($OKM_{ACT} = 1$). Rozważano trzy warianty pracy regulatora transformatora blokowego: wariant A, w którym zaproponowany algorytm regulacji transformatora nie działał; wariant B, w którym zaproponowany algorytm regulacji transformatora był załączony, a granicę aktywacji członu przeciwdziałającego pobudzeniu OKM nastawiono na $dQ = 0,25$; oraz wariant C, w którym wartość tego parametru była równa 0,1. Do pozytywnych efektów wynikających z zastosowania proponowanego rozwiązania należy obniżenie napięcia bloku (rys. 2c) oraz zwiększenie zakresu regulacji mocy biernej (rys. 2e). Rozszerzenie dyspozycyjnego zakresu mocy biernej istotnie ogranicza ryzyko awaryjnego odstawienia generatora z pracy synchronicznej.

W sytuacji deficytu mocy biernej w SEE (rys. 3) napięcia w sieci obniżają się. Spadek napięcia na szynach bloku powoduje reakcję regulatora generatora skutkującą zwiększeniem wartości prądu wzbudzenia (rys. 3d), a w konsekwencji wzrostem generacji mocy biernej (rys. 3f). Zwiększona generacja mocy biernej powoduje wzrost napięcia generatora. W przypadku rozwiązań stosowanych w krajowych elektrowniach i elektrociepłowniach wyposażonych w transformatory z możliwością zmiany przekładni pod obciążeniem (przebiegi oznaczone kolorem czerwonym) regulator transformatora blokowego spowodowałby zmianę zaczeu w celu utrzymania zadanego napięcia

generatora (rys. 3a). Zmiana przekładni transformatora blokowego (rys. 3e) w kierunku utrzymania zadanej wartości napięcia generatora (obniżenie napięcia) skutkuje skokowym wzrostem wartości prądu wzbudzenia i prądu generatora (rys. 3b i d). W chwili $t = 450$ s zadziałał ogranicznik prądu wzbudzenia, co spowodowało ograniczenie mocy biernej generatora i bloku (rys. 3f). Z punktu widzenia stabilności pracy systemu jest to niepożądane, albowiem zwiększa ogólny deficyt mocy biernej w systemie.



Rys. 2. Porównanie przebiegów wybranych wielkości dla przypadku pobudzenia OKM: a) napięcie generatora, b) prąd generatora, c) napięcie bloku, d) prąd wzbudzenia, e) zapas regulacyjny mocy biernej, f) moc bierna generatora



Rys. 3. Porównanie przebiegów wybranych wielkości dla przypadku z nieaktywnym i aktywnym (opisanym jako zRT) członem w regulatorze transformatora blokowego przeciwdziałającym działaniu ograniczników prądowych: a) napięcie generatora, b) prąd generatora, c) napięcie bloku, d) prąd wzbudzenia, e) aktualny numer zaczeptu transformatora blokowego, f) moc bierna generatora

Kolorem niebieskim (rys. 3) pokazano przebiegi uzyskane dla przypadku, w którym zastosowano autorskie rozwiązanie przedstawione na rys. 1b. Tym razem w czasie symulacji $t = 150$ s spełniony został warunek $I_f > I_{fmaxT}$ – w regulatorze transformatora blokowego następuje aktywowanie członu przeciwdziałającego zadziałaniu ogranicznika prądu wzbudzenia ($OPW_{ACT} = 1$), a po mniej więcej 50 s członu przeciwdziałającego zadziałaniu ogranicznika prądu stojana (spełniony warunek $I_g > I_{gmaxT}$, $OPS_{ACT} = 1$). Wysoki stan zmiennej OPW_{ACT} aktywuje ciągłą (skok co 60 s) korektę wartości zadanej napięcia generatora (rys. 3a). Zmiana wartości zadanej napięcia generatora skutkuje zmianą przekładni transformatora (rys. 3e) oraz wzrostem napięcia na szynach generatora (rys. 3a). Zastosowanie proponowanego rozwiązania prowadzi do szeregu pozytywnych efektów. Uzyskuje się ograniczenie prądów wirnika i stojana (rys. 3a i b) oraz utrzymanie napięcia bloku (rys. 3c), a w efekcie utrzymanie większego poziomu generacji mocy biernej (rys. 3f).

Reasumując, niezależnie od rodzaju zaburzenia, deficytu czy nadmiaru mocy biernej w systemie zaproponowane rozwiązania sprzyjają poprawie bezpieczeństwa pracy systemu dzięki dynamicznej zmianie zakresu dyspozycyjnej mocy biernej generatora.

Efektorem prac prowadzonych przeze mnie w latach 2007–2010 w ramach Projektu Badawczego Zamawianego nr PBZ-MEiN-1/2/2006 pt. *Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju* było między innymi opracowanie autorskiej ankiety rozesłanej do kilkudziesięciu spółek dystrybucyjnych. Pozwoliło to na określenie aktualnego stanu praktyk inżynierskich związanych z eksploatacją transformatorów zasilających sieć rozdzielczą. Wybrane wyniki wspomnianej ankiety zawarto w monografii [1].

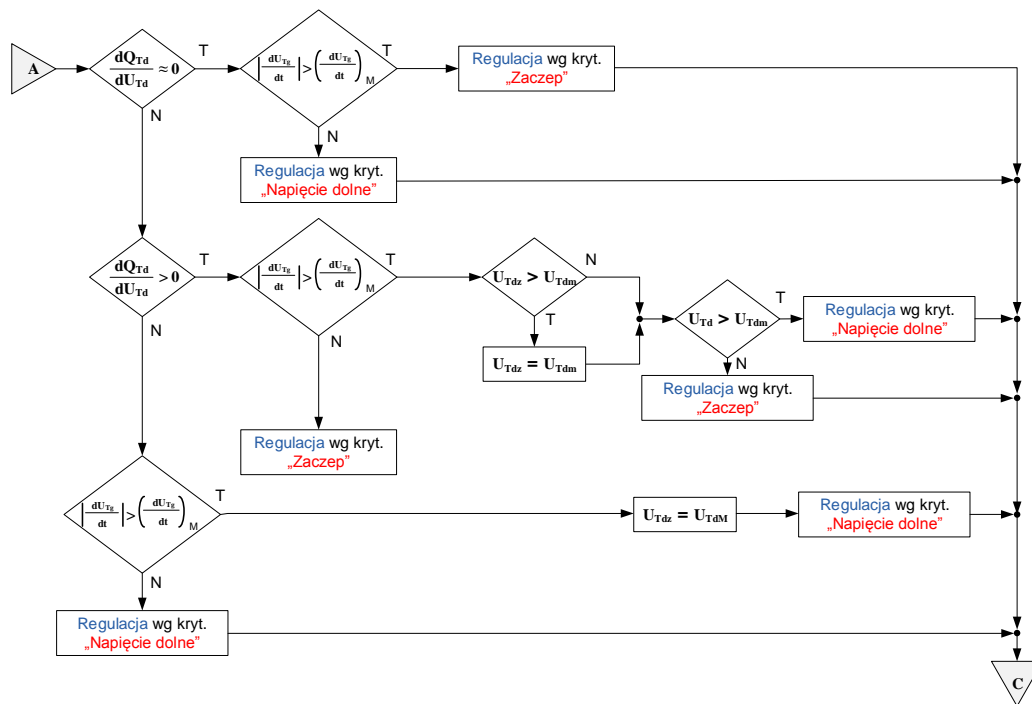
Wyniki pomiarów prowadzonych przeze mnie wraz z zespołem w stacjach GPZ w latach 2007–2008 wskazały, że w nielicznych stacjach współczynnik dQ/dU jest bliski 0 lub ujemny. Jest to sytuacja niekorzystna, gdyż obniżanie napięcia na zaciskach odbiornika skutkuje w takim przypadku wzrostem poboru mocy biernej. Takie zachowanie odbiorów jest niepożądane w sytuacji, w której spadek napięcia jest wynikiem deficytu mocy biernej w systemie, gdyż przyczynia się do jego pogłębienia. Ujemna wartość współczynnika dQ/dU występuje między innymi w sieciach z dużym nasyceniem maszyn indukcyjnych, które stanowią na przykład napędy urządzeń chłodniczych i klimatyzatorów. Międzynarodowa Agencja Energii (IEA) wydała raport pt. *The Future of Cooling* [11], w którym przewiduje, że rosnące wykorzystanie klimatyzatorów w domach i biurach na całym świecie w ciągu najbliższych trzech dekad będzie jednym z głównych czynników globalnego zapotrzebowania na energię elektryczną. Problem ten opisywany jest również w innych publikacjach [13, 14]. Jak wykazały wyniki badań zawarte w [13, 15–19], współczynnik podatności napięciowej mocy biernej dQ/dU tych urządzeń przy niższych napięciach jest ujemny.

Analiza algorytmów działania regulatorów transformatorów zasilających sieć rozdzielczą wykazała, że nie istnieje rozwiązanie, które uwzględni zmianę charakteru współczynnika dQ/dU . Istnieje natomiast komercyjny urządzenie o nazwie Collapse Prediction Relay (CPR-D) oferowane przez firmę A- Eberle [20]. Jego algorytm jest jednak bardzo złożony. Do określenia potrzeby zablokowania lub właściwego wysterowania przełącznika zaczepów transformatora wykorzystuje się: teorię bifurkacji w połączeniu z elementami sieci neuronowych, określanie wykładników Lapunowa, identyfikację obniżania się napięcia czy wreszcie współczynników tłumienia.

Mając na uwadze powyższe, podjąłem próbę opracowania skutecznego, a zarazem prostego sposobu sterowania pracą transformatora zasilającego sieć rozdzielczą. Zasadnicza różnica pomiędzy wspomnianym układem CPR-D a proponowanym algorytmem współautorskim¹ polega na określonym celu działania. W przypadku układu CPR-D celem jest identyfikacja stanu zagrożenia, natomiast celem zastosowania proponowanego adaptacyjnego układu regulacji transformatorów zasilających sieć rozdzielczą [3] jest niedopuszczenie do powstania sytuacji zagrożenia lawiną napięcia.

W proponowanym rozwiązaniu zakłada się, że w stanach normalnej zmienności napięć w systemie regulator transformatora realizuje typowy algorytm sterowania (wejście A znajduje się za typowym algorytmem regulacji napięcia rys. 4). Zmiana algorytmu sterowania następuje w sytuacji przekroczenia nastawionej wartości szybkości zmian napięcia dU_{Tg}/dt po stronie WN (rys. 4).

¹ Patent [3] jest rozwiązaniem współautorskim zrealizowanym przy 30% współudziale prof. Zbigniewa Szczerby – stosowne poświadczenie w załączniku 5-C.



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu adaptacyjnego regulatora transformatora 110 kV/SN

W monografii [1] poza analizą teoretyczną uzasadniającą przyjęte założenia przedstawiono też wybrane wyniki badań potwierdzających pozytywne efekty wynikające z zastosowania proponowanego rozwiązania. Weryfikację skuteczności działania przeprowadzono w oparciu o wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych z wykorzystaniem modeli fizycznych. Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych pokazano na rys. 5 i 6.

Rozważono trzy warianty algorytmu regulatora transformatora:

- „alg. URT”, czyli algorytm regulatora transformatora identyczny z algorytmem regulatora komercyjnego produkowanego przez Instytut Energetyki o. Gdańsk o nazwie handlowej URT;
- „Nowy ($U_z = \text{var}$)”, czyli algorytm proponowany;
- „Nowy ($\mathcal{G}_{\text{treeze}}$)”, czyli wariant porównawczy, w którym wykorzystano algorytm zgodny z proponowanym, z tym że do czasu spełnienia warunku $U_{\text{SN}}(t) \leq U_{\text{ext}}$ wstrzymany był proces zmiany przekładni.

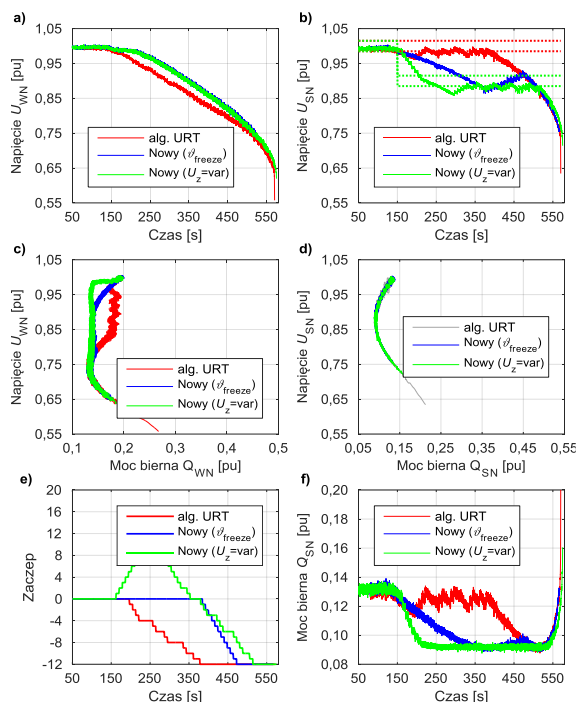
Na rys. 5 i 6 pokazano dwa warianty zaburzeń i szybkości zmian przekładni. W pierwszym z nich, oznaczonym jako wariant A, emulowano działanie elektromechanicznego przełącznika zaczepów, a początkowa szybkość zmian napięcia była mniejsza niż wartość graniczna wyznaczona z zależności (2) dla danych $du = 0,2\%$, $t_{\Sigma} = 8$ s, jednak powodowała aktywację członu przeciwdziałającego lawinie napięcia.

Maksymalną wartość szybkości spadku napięcia można wyznaczyć z zależności:

$$dU_{Tg}/dt|_M = \frac{-du_{\%}}{t_{\Sigma}} \quad (2)$$

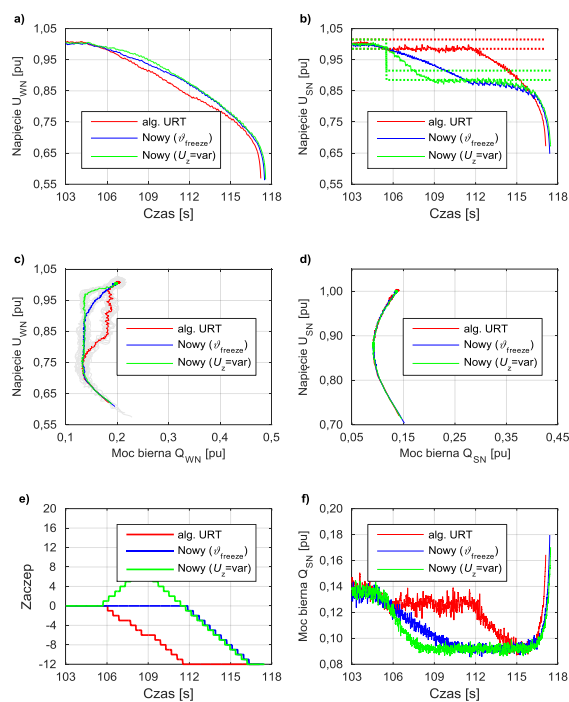
W przypadku drugim, oznaczonym jako wariant D, wykorzystano możliwości regulacyjne energoelektronicznego przełącznika zaczepów, w który wyposażony był badany transformator.

Założono ponadto, że maksymalna początkowa szybkość spadku napięcia będzie ok. 30-krotnie większa od wartości granicznej wyznaczonej dla wariantu A.



Rys. 5. Weryfikacja skuteczności działania proponowanego algorytmu, testy na modelu fizycznym – wariant A:

- a) przebieg zmienności napięcia po stronie WN,
- b) przebieg zmienności napięcia po stronie SN,
- c) charakterystyki $U_{WN} = f(Q_{WN})$, d) charakterystyki $U_{SN} = f(Q_{SN})$, e) aktualna pozycja numeru zaczepu, f) przebieg zmienności mocy biernej Q_{SN}



Rys. 6. Weryfikacja skuteczności działania proponowanego algorytmu, testy na modelu fizycznym – wariant D:

- a) przebieg zmienności napięcia po stronie WN,
- b) przebieg zmienności napięcia po stronie SN,
- c) charakterystyki $U_{WN} = f(Q_{WN})$, d) charakterystyki $U_{SN} = f(Q_{SN})$, e) aktualna pozycja numeru zaczepu, f) przebieg zmienności mocy biernej Q_{SN}

Pozytywny efekt zastosowania proponowanego rozwiązania jest najlepiej widoczny w sytuacji, gdy szybkość spadku napięcia jest istotnie mniejsza od szybkości procesu regulacji przekładni (rys. 5). Przy typowym algorytmie regulacji napięcia transformatora w stacji GPZ (tu reprezentowany przez alg. URT – przebiegi pokazane kolorem czerwonym) utrzymywana jest stała wartość zadana po stronie wtórnej transformatora (rys. 5b, napięcie U_{SN}). Z punktu widzenia jakości zasilania odbiorców jest to działanie pożądane. Niestety w sytuacji deficytu mocy w systemie utrzymanie takiego kryterium regulacji skutkuje zmniejszeniem granicy stabilności napięciowej po stronie pierwotnej transformatora (rys. 5c). Znacznie korzystniejsze efekty uzyskuje się, stosując zaproponowane rozwiązanie (rys. 4). W wyniku aktywacji jednego z członów proponowanego algorytmu (przebiegi zaznaczone kolorem zielonym) następuje zmiana wartości zadanej napięcia powodująca skokowy wzrost wartości uchybu, co skutkuje zmianą przekładni w kierunku powodującym obniżenie napięcia. Ponieważ w rozważanym zakresie wartość współczynnika dQ/dU jest większa od 0, następuje szybka redukcja mocy biernej przepływającej przez transformator w stacji GPZ (rys. 5f) oraz zwiększenie zapasu stabilności napięciowej w sieci zasilającej (rys. 5c). Ograniczenie poboru mocy biernej skutkuje również ograniczeniem spadku napięcia U_{WN} (rys. 5a). Dodatkowym pozytywnym efektem korekty wartości zadanej jest zmiana kierunku przełączania zaczepów (rys. 5e). W efekcie zwiększają się aktualne możliwości regulacyjne, co skutkuje dłuższym czasem utrzymania zredukowanej mocy.

Emulowana szybkość zmiany napięcia zasilającego U_{WN} w wariancie D była ok. 30-krotnie większa niż dla wariantu A. Ponieważ szybkość procesu regulacji wynikająca z zastosowania energoelektronicznego przełącznika zaczepek była ok. 20-krotnie większa (ok. 300–400 ms), to dzięki zastosowaniu proponowanego rozwiązania uzyskano równie pozytywne efekty, jak w układzie z emulowanym elektromechanicznym przełącznikiem zaczepek. Podobnie jak dla wariantu A, uzyskano zwiększenie zapasu stabilności napięciowej (rys. 6c), ograniczenie szybkości spadku napięcia zasilającego U_{WN} (rys. 6a) oraz zwiększenie aktualnego zakresu regulacji (rys. 6f). Efekty działania algorytmu przyjętego do porównań (kolor niebieski) w każdym z rozważanych przypadków są zauważalnie mniej korzystne od algorytmu autorskiego, a zatem jako rekomendowane należy przyjąć rozwiązanie pokazane na rys. 4.

Przedstawione wyniki testów potwierdziły zarówno skuteczność, jak i uniwersalność działania zaproponowanego algorytmu. Dezaktywacja zwłoki zależnej i zmiana wartości zadanej napięcia pozwoliły ograniczyć pobór mocy biernej przy bardzo niskich napięciach. W przypadku zastosowania proponowanego rozwiązania w większości stacji GPZ można oczekiwać znaczącego zwiększenia poziomu jego pozytywnego oddziaływania na system – efekt skali.

Zaprezentowane w monografii [1] wyniki badań i testów obu autorskich algorytmów wykazały ich skuteczność. Ich zastosowanie pozwala na zwiększenie zapasu stabilności napięciowej węzła, w którym są stosowane, a tym samym redukcję ryzyka powstania lawiny napięcia. Prostota proponowanych rozwiązań zwiększa ich praktyczną przydatność, co potwierdziły testy z wykorzystaniem rzeczywistego transformatora z możliwością zmiany przekładni pod obciążeniem. Aktualnie prowadzone są rozmowy nad możliwością ich wdrożenia w rozwiązaniach komercyjnych.

Ostatnia część monografii [1] poświęcona jest przedstawieniu sposobów poprawy właściwości regulacyjnych transformatorów konwencjonalnych dzięki wykorzystaniu urządzeń energoelektronicznych. Do głównych wad transformatora jako obiektu regulacji zalicza się przede wszystkim ograniczoną szybkość zmian oraz dyskretny charakter regulacji. W ostatnich latach, między innymi w związku z intensywnym rozwojem generacji rozproszonej oraz sieci typu Smart Grid, pojawiło się wiele nowych koncepcji sterowania pracą transformatorów przeznaczonych głównie dla sieci dystrybucyjnych. Część z nich bazuje na zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań do konwencjonalnych transformatorów elektroenergetycznych, część zaś proponuje zupełnie odmienny sposób konwersji energii pomiędzy sieciami o różnym poziomie napięć. Proponowane rozwiązania można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- transformatory konwencjonalne wyposażone w energoelektroniczny przełącznik zaczepek;
- układy hybrydowe stanowiące połączenie transformatora konwencjonalnego z dedykowanymi układami energoelektronicznymi;
- transformatory energoelektroniczne (ang. *solid-state transformer*, SST).

Do niewątpliwych zalet układów energoelektronicznych mogących znaleźć zastosowanie w regulacji napięcia i mocy biernej w SEE należy ich szybkość działania oraz względna łatwość sterowania niezależnie w każdej z faz. Głównym ograniczeniem szerszego zastosowania układów energoelektronicznych współpracujących z transformatorami są wysokie koszty ich budowy, tym większe, im wyższe są poziomy napięć i przesyłanej mocy. Powyższe powoduje, że operatorzy systemów rzadko sięgają po te rozwiązania. Najbardziej kosztownymi z przedstawionych w monografii [1] rozwiązań są transformatory energoelektroniczne. Największe zainteresowanie tą technologią obserwuje się w sektorze trakcji kolejowej, a to za sprawą istotnej redukcji masy w stosunku do

rozwiązań konwencjonalnych. Doskonałym przykładem jest instalacja pilotażowa opisana w opracowaniu [21]. Nowa koncepcja związana jest ze zmianą sposobu zasilania maszyn trakcyjnych – zamiast układu transformator konwencjonalny / przekształtnik AC/DC/AC proponuje się układ szeregowo połączonych przekształtników AC/DC/AC wysokiego napięcia, transformatora wysokiej częstotliwości oraz przekształtnika AC/DC/AC niskiego napięcia. Z punktu widzenia pracy systemu elektroenergetycznego zaletą opisanego rozwiązania jest zmniejszenie poziomu zaburzeń elektromagnetycznych oraz poziomu zniekształceń harmoniczných, których istotnym źródłem są konwencjonalne stacje trakcyjne. W połączeniu z możliwością płynnej regulacji współczynnika mocy proponowane rozwiązanie może w istotny sposób ograniczyć zmienność napięć w stacjach zasilających oraz ich otoczeniu.

Rozwój energetyki odnawialnej, a zwłaszcza źródeł o małej mocy instalowanych w sieciach najniższych napięć, w tym w instalacjach prosumenckich, jak również rozwój elektromobilności już teraz stawia przed operatorami sieci nowe wyzwania. Należą do nich nie tylko zmiana profili obciążenia sieci determinująca większą zmienność napięć, ale również wzrastająca niesymetria obciążenia. Problem jest tym większy, że transformatory zasilające sieci najniższych napięć nie mają praktycznie żadnych możliwości regulacyjnych. Tym samym dla zapewnienia wymaganej jakości zasilania coraz częściej konieczna jest instalacja dodatkowych urządzeń. Zastosowanie układu hybrydowego może być zatem adekwatnym sposobem zwiększenia możliwości regulacyjnych w węźle zasilającym sieć nn, tym bardziej że do budowy takiego układu można wykorzystać już istniejący transformator. Różnorodność topologii układów hybrydowych pozwala na dobór rozwiązania właściwego do lokalnych potrzeb. W najprostszych rozwiązaniach możliwa jest regulacja napięcia czy też filtracja harmoniczných, a w układach wyposażonych niezależne źródło prądu stałego – regulacja mocy czynnej i biernej, a więc i symetryzacja obciążenia trójfazowego.

Najciekawszym z punktu widzenia moich dalszych prac badawczych jest zamieszczony w monografii [1] opis koncepcji dystrybucyjnego transformatora hybrydowego o wielostrefowej regulacji ciągłej [22], którego prototyp powstaje w laboratorium LINTE² Politechniki Gdańskiej. Idea sterowania zakłada, że transformator z możliwością regulacji przekładni pod obciążeniem zostanie wyposażony w przekształtnik energoelektroniczny AC/DC/AC zwymiarowany na ułamek mocy uzwojenia głównego. Zadaniem przekształtnika będzie zapewnienie płynnej regulacji napięcia pomiędzy kolejnymi przełączeniami zaczeów oraz kompensacja negatywnych skutków związanych ze skokową zmianą zaczeów. W konsekwencji uzyska się płynną regulację napięcia w zakresie determinowanym przez skrajne położenia przełącznika zaczeów oraz pewne rozszerzenie tego zakresu równe $2 \cdot du_{\% \max}$, gdzie $du_{\% \max}$ definiowane jest jako maksymalna procentowa zmiana napięcia wywołana zmianą zaczeów.

Prace nad prototypem wspomnianego transformatora rozpoczną się w najbliższym czasie dzięki uzyskaniu dofinansowania projektu pt. *Dystrybucyjny transformator hybrydowy (DTH) jako aktywny element nowoczesnych systemów „Smart Grid”*, złożonego w konkursie 1/414/2017/POIR w ramach Działania 4.1 „Badania naukowe i prace rozwojowe” w Poddziałaniu 4.1.1 „Projekty Aplikacyjne” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Projekt realizowany będzie przy współudziale producenta transformatorów, a ostatecznym celem jest komercjalizacja opracowanego rozwiązania. Mój udział w przygotowaniu projektu obejmował uczestnictwo w opracowywaniu merytorycznej części projektu. Jako współwykonawca projektu odpowiedzialny jestem za opracowanie zaawansowanych algorytmów sterowania wyższego poziomu. Prace te będą konsekwentnym

rozwięciem moich wieloletnich badań naukowych w zakresie regulacji napięcia i mocy biernej w systemie elektroenergetycznym, których podsumowaniem jest monografia [1].

Szczegółowe rezultaty zaprezentowanego osiągnięcia naukowego

Najważniejszymi dokonaniem zawartymi w przygotowanej monografii [1] są w mojej ocenie:

- opracowanie syntetycznego opisu modeli matematycznych transformatorów z podobciążeniowymi przełącznikami zaczepów;
- kompleksowa analiza wybranych sposobów koordynacji działania regulatora generatora oraz regulatora transformatora blokowego;
- kompleksowa analiza wpływu zmiany przekładni transformatora blokowego na obszar dopuszczalnych stanów pracy generatora i bloku;
- opracowanie nowego algorytmu działania transformatora blokowego zwiększającego dyspozycyjny zakres mocy biernej generatora w sytuacjach deficytu lub nadmiaru mocy biernej w systemie elektroenergetycznym;
- kompleksowa analiza wpływu zmian przekładni transformatora zasilającego sieć rozdzielczą na możliwość powstania lawiny napięcia;
- opracowanie nowego algorytmu działania transformatora zasilającego sieć rozdzielczą pozwalającego zwiększyć zapas stabilności napięciowej, a tym samym ograniczyć ryzyko powstania lawiny napięcia w swoim otoczeniu;
- potwierdzenie dużej praktycznej przydatności proponowanych rozwiązań autorskich w badaniach laboratoryjnych z wykorzystaniem modeli fizycznych;
- praktyczna implementacja opracowanych sposobów sterowania pracą transformatorów w sterownikach jednostek funkcjonalnych w laboratorium LINTE²;
- wykazanie celowości oraz możliwości poprawy istniejących algorytmów sterowania transformatorami z regulacją przekładni pod obciążeniem;
- opracowanie metodyki wyznaczania charakterystyki $U = f(Q)$ dla stacji GPZ;
- dyskusja podstaw teoretycznych, uwarunkowań technicznych oraz aktualnego stanu praktyki inżynierskiej w zakresie stosowanych w KSE algorytmów regulacji transformatorów z możliwością zmiany przekładni pod obciążeniem;
- analiza aktualnych trendów badawczo-rozwojowych związanych z wykorzystaniem urządzeń energoelektronicznych do poprawy właściwości regulacyjnych konwencjonalnych transformatorów.

Podsumowanie zaprezentowanych osiągnięć naukowych:

1. Zaproponowałem nowe algorytmy sterowania transformatorami z regulacją przekładni pod obciążeniem na podstawie analizy teoretycznej wybranych stanów pracy układów regulacji napięcia w głównych węzłach systemu elektroenergetycznego.
2. Przeprowadziłem wszechstronne badania symulacyjne i potwierdziłem, że zaproponowane nowe algorytmy sterowania transformatorami z regulacją przekładni pod obciążeniem są skuteczne, a ich zastosowanie prowadzi do istotnej poprawy jakości sterowania procesem regulacji napięcia w systemie elektroenergetycznym.
3. Przeprowadziłem obszerne badania eksperymentalne z wykorzystaniem fizycznych modeli wybranych węzłów systemu elektroenergetycznego z transformatorem z energoelektronicznym przełącznikiem zaczepów oraz wykazałem, że opracowane algorytmy regulacji napięcia w systemie

elektroenergetycznym są efektywne i skuteczne i mogą być z powodzeniem wdrożone w praktyce eksploatacyjnej przedsiębiorstw elektroenergetycznych.

4. Wskazałem kierunki i możliwości kontynuacji oraz rozwoju prowadzonych badań naukowych w celu uwzględnienia zaawansowanych algorytmów regulacji napięcia w systemie elektroenergetycznym przy wykorzystaniu nowych typów transformatorów, takich jak transformatory z energoelektronicznymi przełącznikami zaczepów, transformatory hybrydowe czy też transformatory energoelektroniczne.

W mojej ocenie za pomocą przeprowadzonych badań naukowych jednoznacznie wykazałem, że wykorzystanie opracowanych algorytmów sterowania transformatorami z regulacją przekładni pod obciążeniem może zwiększyć bezpieczeństwo systemu elektroenergetycznego w wybranych stanach jego pracy, przez co zgłoszone osiągnięcie naukowe stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny elektrotechnika.

Bibliografia związana z monografią habilitacyjną – pozycje wybrane

- [1] **Małkowski R.:** *Transformatory z regulacją przekładni pod obciążeniem w systemie elektroenergetycznym – zagadnienia wybrane.* Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2019. Cykl: Monografie 182 (ISBN 978-83-7348-778-9).
- [2] **Małkowski R.:** *Sposób regulacji transformatora blokowego z podobciążeniowym przełącznikiem zaczepów.* Zgłoszenie patentowe. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, P.429389. Warszawa 2019.
- [3] **Małkowski R., Szczerba Z.:** *Sposób regulacji transformatorów zasilających sieć rozdzielczą.* Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, PL 217312. Warszawa 2014.
- [4] Machowski J., Kacejko P.: *Influence of automatic control of a tap changing step-up transformer on power capability area of generating unit.* Electric Power Systems Research 2016, vol. 140, s. 46–53.
- [5] Machowski J., Kacejko P.: *Wpływ regulacji przekładni transformatora blokowego na dopuszczalny obszar pracy zespołu wytwórczego.* „Przegląd Elektrotechniczny” 2015, nr 1, s. 3–10.
- [6] **Małkowski R., Szczerba Z., Zbroński A.:** *Analiza możliwości koordynacji algorytmów działania regulatora transformatora blokowego i regulatora generatora.* Acta Energetica 2010; 2:35-42.
- [7] **Małkowski R., Zbroński A.:** *Koordinacja algorytmów działania regulatora transformatora blokowego z wieloparametrowym regulatorem generatora.* Energetyka, problemy energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej 2010. ISBN 0013-7294.
- [8] Kolendo P., Szuca M., Drop M.: *Zastosowanie transformatorów blokowych z regulacją podobciążeniową w układach regulacji grupowej Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Elektroenergetyczna Automatyka Zabezpieczeniowa [Use of unit transformers with on-load control in group control systems of the National Power System. Electrical power automatic protections in thermal power plants].* Seminarium Koźienice (2014).
- [9] Kolendo P., Jendrzewska A., Szuca M., Ogryczak T.: *Current Issues of Group Control in the Example of Solutions for the Włocławek Node.* Acta Energetica 09/2017 (2017).
- [10] Opala K., Rozenkiewicz P., Kolendo P.: *Development of algorithms for local interoperation of phase shift transformers automatic controls with ARST/ARNE in a regulation node, Stage I.* A study of the Institute of Power Engineering (2015).
- [11] Sołtysiak M., Kolendo P., Szuca M., Ogryczak T.: *Adaptive algorithm of generator reactive power control range expansion in national grid system.* IEEE Publication Electronic, ISBN: 978-1-4673-9187-0, ISBN: 978-1-4673-9188-7 (2016).
- [12] CIGRE: *Coordinated Voltage Control In Transmission Networks.* Task Force C4.602 (2007).
- [13] Losi A., Mangoni V., Russo M.: *Optimal Exploitation of Generator-Transformer Units.* IEEE Transactions on Energy Conversion 1998, vol. 13, s. 90–95.
- [14] International report: *The Future of cooling. Opportunities for energy-efficient air conditioning.* International Energy Agency 2018, ISBN 978-9-2310-4052-8.

- [15] Gaikwad A.M., Bravo R.J., Kosterev D., Yang S., Maitra A., Pourbeik P.: *Results of residential air conditioner testing in WECC*. IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century 2008, ISBN 978-1-4244-1905-0.
- [16] Li D., Cui G., Sun L., Yang J., Gao C., Chen X.: *A Control Strategy for Static Voltage Stability Based on Air Conditioner Load Regulation*. 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), Hangzhou, 2017, ISBN 978-1-5386-1107-4.
- [17] Tomiyama K., Daniel J.P., Ihara S.: *Modeling Air Conditioner Load for Power System Studies*. IEEE Transactions on Power Systems 1998, vol. 13, s. 414–421.
- [18] Wang Q., Wang H., Yang H., Zhao R.: *Load characteristics-oriented control strategy for air conditioners during voltage sags*. 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2017, ISBN 978-1-5386-3246-8.
- [19] Wu B.E.I., Zhang Y.A.N., Chen M.: *The Effects of Air Conditioner Load on Voltage Stability of Urban Power System*. 6th WSEAS International Conference on Power Systems 2006, s. 40–45.
- [20] A. Eberle „CPR-D Collapse Prediction Relay”, www.a-eberle.de, dostęp: kwiecień 2019 r.
- [21] Claessens M., Dujic D., Canales F., Steinke J.K., Stefanutti P., Veterli C.: *Traction transformation: A power-electronic traction transformer (PETT)*. ABB Library 2012, s. 11–17.
- [22] Strzelecki R., Matelski W., **Małkowski R.**, Tomasov V., Wolski L., Krahel A.: *Distribution Transformer with Multi-Zone Voltage Regulation for Smart Grid System Application*. 6th International conference on energy smart systems 2019, in press.
- [23] Kowalak R., **Małkowski R.**, Szczerba Z., Zajczyk R.: *Automatyka systemowa a bezpieczeństwo energetyczne kraju. Tom 3: Węzły sieci przesyłowej i rozdzielczej*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2013, ISBN 978-7348-467-2.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta

A. Osiągnięcia naukowo-badawcze nieujęte w monografii opisanej w rozdziale 4

Od początku działalności naukowej moje zainteresowania badawcze związane były z szeroko rozumianym bezpieczeństwem systemu elektroenergetycznego. Pierwsze osiągnięcia w tym zakresie były podstawą napisania rozprawy doktorskiej, w której zaproponowałem nowy, autorski algorytm automatyki odciążającej działającej według kryterium częstotliwościowego oraz wykazałem, że działanie tego algorytmu, nazwanego Rozmytą Adaptacyjną Automatyką Odciążającą (RAAO), jest znacznie bardziej efektywne niż algorytmów automatyki odciążającej wykorzystywanych we współczesnych systemach elektroenergetycznych. Tym samym jego zastosowanie może przyczynić się do istotnej poprawy bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego w stanach zagrożenia lawiną częstotliwości.

Działalność naukowo-badawcza po uzyskaniu stopnia naukowego doktora uległa dalszemu poszerzeniu i związana była z analizą oraz rozwiązywaniem wielorakich problemów występujących we współczesnych systemach elektroenergetycznych, przede wszystkim w elektroenergetycznych układach sterowania i automatyce zabezpieczeniowej. W tym zakresie prowadziłem wiele prac i projektów badawczo-rozwojowych, zarówno własnych, jak i zleconych przez podmioty trzecie. Część wyników tych prac znalazło wykorzystanie w praktyce gospodarczej spółek elektroenergetycznych, potwierdzając swoją aktualność i znaczenie w dziedzinie elektroenergetyki.

Wśród prac B+R związanych z bezpieczeństwem systemu elektroenergetycznego na uwagę zasługują między innymi:

- Obszerne badania w ramach projektu *Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju* (Projekt Badawczy Zamawiany nr PBZ-MEiN-1/2/2006, zrealizowany w latach 2007–2010). W ramach badań opracowałem między innymi kompleksowe modele odbiorów mocy oraz modele układów automatyki samoczynnego odciążania działających według kryterium częstotliwościowego i napięciowego, a także wykonałem analizy wpływu dynamiki procesu niezbilansowania na skuteczność procesu SCO oraz analizy roli jednostek wytwórczych, (w tym układów regulacji turbin parowych), w procesie obrony i odbudowy systemu elektroenergetycznego. Efektem przeprowadzonych prac było między innymi opracowanie propozycji modyfikacji prób odbiorowych oraz zmian w zapisach IRiESP. Wybrane wyniki prac zawarto w załączniku 4 pozycje [12], [13].
- Wyniki próby systemowej podania napięcia i mocy rozruchowej z ESP Żarnowiec do Elektrowni Koźienice, która odbyła się 3.05.2015 r. W ramach badań własnych przeanalizowałem wybrane przebiegi wcześniejszych prób tworzenia torów rozruchowych pomiędzy elektrownią wodną a elektrownią konwencjonalną. Na ich podstawie opracowałem uniwersalne wytyczne dla takich prób. Opracowane przeze mnie rekomendacje zostały wdrożone do realizacji (potwierdzenie wdrożenia zawarto w załączniku 5–G). Zaproponowane rozwiązanie polegało na dezaktywacji ogranicznika niedobudzenia oraz aktywacji kompensacji prądowej nastawionej zgodnie z zaleceniami. Główna idea została przedstawiona w opracowaniach [48], [41], a uzupełniona o wyniki i przebieg próby systemowej w opracowaniu [2] – wskazanych w załączniku 4.
- Analiza poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego oraz świadomości sytuacyjnej w sektorze elektroenergetyki, która zaowocowała opracowaniem wytycznych oraz zaleceń do budowy

bezpiecznej i wydajnej platformy wymiany informacji dla podmiotów przyłączonych do systemu elektroenergetycznego (załącznik 4 pozycje [9], [38], [44]).

Kolejną grupę osiągnięć stanowią prace B+R związane z regulacją napięć i rozpliwów mocy biernej, zrealizowane na zlecenie operatorów sieci dystrybucyjnych. Do najważniejszych należą:

- Badania stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego, w tym opracowanie metod przeciwdziałania lawinie napięciowej. Na bazie analiz symulacyjnych wskazałem poprawny sposób modelowania układu wzbudzenia generatorów oraz określiłem kryteria, według których możliwe jest skuteczne odciążanie jednostek wytwórczych poprzez redukcję generacji mocy czynnej (załącznik 4 pozycje [19], [24], [26], [29], [61]).
- Analizy wpływu kompensatorów bocznikowych, niesterowalnych (baterie kondensatorów, dławiki) i sterowalnych (TCR, SVC, STATCOM) na pracę systemu elektroenergetycznego w stanach ustalonych i nieustalonych (załącznik 4 pozycje [17], [25], [43], [45], [56]). W ramach badań opracowałem między innymi algorytm wstępnej weryfikacji efektywności instalowania kompensatorów typu SVC w węzłach systemu elektroenergetycznego. Badania przeprowadzono w oparciu o krzywe nosowe $U = f(Q, P, S)$ przy zachowaniu bilansu wymiany międzysystemowej oraz ograniczeń w węzłach wytwórczych.
- Analizy różnych sposobów koordynacji działania transformatora i kompensatorów typu SVC, w zależności od miejsca zainstalowania – stacja GPZ lub stacja przesyłowa. Realizowane prace pozwoliły wskazać najbardziej efektywne sposoby koordynacji działania regulatorów transformatora i kompensatora SVC (załącznik 4 pozycje [42], [52]).
- Analizy przyłączenia do sieci dystrybucyjnych oraz pracy na sieć wydzieloną układów generacji rozproszonej, w ramach których przeprowadziłem obszerne badania nad sposobem wykorzystania w procesach regulacji napięcia i mocy biernej różnych typów źródeł generacji rozproszonej (farma wiatrowa, biogazownia, mała elektrownia wodna) zainstalowanych w sieci SN (załącznik 4 pozycje [22]).
- Opracowanie zasad instalowania oraz algorytmów sterowania baterii kondensatorów pozwalających na ograniczenie strat w sieciach dystrybucyjnych. Wyniki prac zostały wdrożone w zintegrowanym systemie zarządzania energią elektryczną ECV-2.0, opracowanym na rzecz prywatnego przedsiębiorstwa w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.4-4.1 (potwierdzenie wdrożenia zawarto w załączniku 5–H).

Ważne osiągnięcie naukowe stanowią również prace badawcze zrealizowane we współpracy z zespołem naukowym prof. Zbigniewa Lubośnego, obejmujące zagadnienia sterowania farmami wiatrowymi w systemie elektroenergetycznym. Celem prowadzonych przeze mnie badań było wyznaczenie modelu dynamicznego pojedynczej siłowni wiatrowej na podstawie dostępnych danych pomiarowych. W procesie identyfikacji wykorzystano trzy modele: model ARX (liniowy model autoregresji), model OE (ang. Output Error), model błędu wyjściowego oraz model typu BJ (Box-Jenkins) wykorzystujący modele autoregresywnej średniej ruchomej (ang. *autoregressive moving averages*, ARMA) lub autoregresywnej zintegrowanej średniej ruchomej (ARIMA). Wykazano, że najlepszą z rozważanych metod jest metoda BJ, a w celu uzyskania modelu elektrowni wiatrowej w postaci transmitancji niskiego rzędu nie należy uwzględniać próbek wstecznych.

W latach 2012–2013 wraz z zespołem opracowałem koncepcję rozwoju jednej z gmin pomorskich w zakresie technologii energetycznych (załącznik pozycja [25]). Zakres projektu był rozległy, natomiast moje prace koncentrowały się na opracowaniu koncepcji rozwoju farm wiatrowych w gminie. Na podstawie wykonanych badań symulacyjnych wskazałem zakres niezbędnych zmian sieciowych

w różnych horyzontach czasowych, ryzyka wynikające z dużej dynamiki rozwoju farm wiatrowych w bliskim otoczeniu gminy oraz czasochłonności procesów inwestycyjnych związanych z wymaganym rozwojem sieci.

Reasumując, w efekcie zrealizowanych przeze mnie prac badawczych powstało wiele modeli matematycznych różnych elementów systemu elektroenergetycznego, o różnym stopniu złożoności i zaawansowania. Opracowałem wiele rozwiązań poprawiających bezpieczeństwo systemu elektroenergetycznego. Wszystkie zaproponowane przeze mnie rozwiązania zostały zrealizowane i zweryfikowane w różnych pakietach oprogramowania służących do wykonywania analiz symulacyjnych systemu elektroenergetycznego, takich jak Plans, PowerFactory, EMTDC/PSCAD, PSLF czy MatlabSimulink.

B. Osiągnięcia związane z tworzeniem i rozwojem dużej infrastruktury badawczej

Znacząca część mojego dorobku naukowego związana jest z modelowaniem różnych elementów systemu elektroenergetycznego. Zdobywaniu doświadczeń w zakresie tworzenia i rozwiązywania modeli symulacyjnych, przeznaczonych do prowadzenia prac badawczych w różnych obszarach elektroenergetyki, towarzyszyła narastająca potrzeba weryfikacji prac teoretycznych za pomocą testów eksperymentalnych.

W efekcie w latach 2005–2013 stworzyłem na Politechnice Gdańskiej, a następnie konsekwentnie wdrażałem, koncepcję rozbudowy zespołu infrastruktury naukowo-badawczej, jaką jest laboratorium *Model fizyczny elektroenergetycznego węzła wytwórczego*, którego jestem **opiekunem naukowym**. Powstały nowe stanowiska badawcze. W pierwszej fazie były to: model fizyczny jednostki wytwórczej emulującej działanie elektrowni cieplnej, model fizyczny układu HVDC oraz układ do światłowodowej transmisji danych. W drugiej fazie rozbudowy były to: model fizyczny odbiornika z odzyskiem energii, modele fizyczne układów SVC, STATCOM. W kolejnych latach zbudowano stanowiska umożliwiające projektowanie układów regulacji z wykorzystaniem sterowników programowanych.

Uzyskaniu dużych możliwości badawczych służyło również wyposażenie stanowisk laboratoryjnych w programowalne układy regulacji. Środki finansowe pozyskane przeze mnie na rozwój infrastruktury badawczej w kwocie **ponad 1 mln zł** pochodziły z grantów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (decyzja nr 155/05/E-359/S/2008) oraz z Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2007–2013 (projekt o nazwie *Stworzenie nowoczesnej infrastruktury technicznej dla realizacji programu kształcenia Inżynierów Przyszłości w Politechnice Gdańskiej*).

Doświadczenia zdobyte przy realizacji opisanych powyżej prac rozwojowych z wykorzystaniem modeli fizycznych elementów systemu elektroenergetycznego posłużyły mi przy realizacji projektu pn. *Laboratorium Innowacyjnych Technologii Elektroenergetycznych i Integracji Odnawialnych Źródeł Energii (LINTE²)*. Projekt o budżecie **ponad 50 mln zł**, sfinansowany z Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013, został zrealizowany na Politechnice Gdańskiej w latach 2010–2015 i przyczynił się do powstania **laboratorium LINTE²** – unikalnej w skali światowej dużej infrastruktury badawczej przeznaczonej do wszechstronnego modelowania i testowania nowoczesnych systemów elektroenergetycznych.

Jako członek zespołu projektowego oraz koordynator projektu ds. elektroenergetyki brałem czynny udział w opracowaniu zarówno całościowej koncepcji laboratorium, jak i szczegółowych wymagań funkcjonalnych i technicznych w odniesieniu do poszczególnych urządzeń i podsystemów. Wśród tych ostatnich na uwagę zasługuje system sterowania i komunikacji do zarządzania pracą

laboratorium, obejmujący sieć komunikacyjną Ethernet, dyspozytornie ze stanowiskami operatorskimi i inżynierskimi oraz rozproszone inteligentne urządzenia elektroniczne (sterowniki polowe, lokalne sterowniki urządzeń i in.). W ramach realizacji projektu opracowałem wymagania dotyczące układów regulacji większości stanowisk, w którym to zadaniu wykorzystałem wcześniejsze doświadczenia i osiągnięcia związane z analizą pracy systemu elektroenergetycznego (np. w regulatorach jednostek LOAD zaimplementowałem autorski algorytm automatyki odciążającej RAAO). Opracowałem koncepcję i wymagania dla modułu harmonogramowania oraz przeprowadzania eksperymentów automatycznych. Na etapie uruchamiania laboratorium LINTE² byłem również odpowiedzialny za przeprowadzenie testów odbiorowych większości stanowisk. Do moich zadań należało wówczas opracowanie harmonogramu testów pozwalających na kompleksową weryfikację spełnienia wymagań postawionych w SIWZ. Pełniłem nadzór nad poprawnym przebiegiem testów odbiorowych, wskazując uchybienia, a w przypadkach problematycznych prowadziłem konsultacje z wykonawcami dotyczące sposobu rozwiązania zaistniałych problemów.

Obecnie, od roku 2016, pracuję w laboratorium LINTE² jako zastępca kierownika laboratorium ds. badań naukowych. Badania prowadzone w laboratorium obejmują między innymi systemy i urządzenia elektroenergetyczne, cyfrowe układy elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, rozproszone systemy sterowania w stacjach i centrach dyspozytorskich oraz inne rozwiązania dedykowane do zastosowań w inteligentnych sieciach elektroenergetycznych (Smart Grids). Ważnym aspektem prac badawczo-rozwojowych jest również elektromobilność. W ciągu trzech lat działalności z laboratorium skorzystało kilkadziesiąt zespołów naukowych oraz przedsiębiorstw komercyjnych, a moja aktywność w tym zakresie polega na przygotowaniu i/lub realizacji większości eksperymentów badawczych. Zestawienie najważniejszych prac badawczo-rozwojowych zawarto w tablicy 3.1.

Tablica 3.1

Zestawienie prac badawczo-rozwojowych zrealizowanych w laboratorium LINTE²
w latach 2016–2019

Lp.	Rok	Tytuł
1	2016	Akwizycja i przetwarzanie sygnału wizyjnego oraz informacji pozyskiwanych z sensorów w obecności silnych zakłóceń elektromagnetycznych
2		Badania akustyczne samochodu elektrycznego
3	2017	Pomiary rezystancji izolacji specjalistycznych przewodów wysokonapięciowych
4		Pomiary do weryfikacji algorytmu wyznaczania temperatury transformatora dystrybucyjnego
5		Badania wpływu warunków pogodowych i kongestii ruchu ulicznego na zasięg jazdy samochodów elektrycznych
6		Modelling and analysis of medium frequency transformers for power converters
7		Testy współdziałania urządzeń automatyki elektroenergetycznej wykorzystujących sieci komputerowe i protokół IEC 61850
8		Dwuwirirowa elektrownia wiatrowa z generatorem o ruchomych magniesnicy i tworniku
9		Stanowisko do badania generatorów wolnoobrotowych przeznaczonych do współpracy z turbinami wiatrowymi o pionowej osi obrotu
10		Wykonanie pomiarów z wykorzystaniem systemu grawimetrycznego MGS-6 firmy LaCoste & Romberg

Zestawienie prac badawczo-rozwojowych zrealizowanych w laboratorium LINTE²
w latach 2016–2019

Lp.	Rok	Tytuł
11	2018	Badanie wpływu parametrów gruntu na obciążalność prądową długotrwałą kabli elektroenergetycznych
12		Weryfikacja wymagań odbiorczych stawianych układom regulacji napięcia generatorów synchronicznych
13		Ładowanie szybkie samochodu elektrycznego w systemach Smart Grid z elektrownią słoneczną i zasobnikami energii
14		Analiza przedinwestycyjna lokalizacji mikroturbin wiatrowych
15	2019	Pomiary przemieszczeń i deformacji metodą laserową
16		Support Tool for Energy Efficiency Programmes in Medical Centres
17		Badania efektywności anteny sferycznej
18		Systemy ładowania bezprzewodowego małowadliwych pojazdów mobilnych
19		Regulacja elektrochemicznego zasobnika energii zmniejszająca wpływ pracy źródeł odnawialnych na sieć dystrybucyjną
20		Praca równoległa oraz grupowe sterowanie podobciążeniowymi przełącznikami zaczepów transformatorów energetycznych
21		Badania czynników wpływających na zasięg jazdy samochodu elektrycznego
22		System rejestracji przebiegów szybkozmiennych parametrów ruchowych samochodu elektrycznego
23		Badania generatora synchronicznego Elmor GCh1 140/4 z rejestracją wielkości elektrycznych i mechanicznych
24		Badania przekształtników wielopulsowych z filtrami aktywnymi zintegrowanych magnetycznie
25		Krótkoterminowe prognozowanie produkcji energii elektrycznej w elektrowniach słonecznych
26		Regulacja przekładni transformatora w sytuacji zagrożenia lawiną napięcia
27		Energy Efficiency for Public Transport Infrastructure in Central Europe
28		Wykorzystanie baterii akumulatorów w procesie ładowania pojazdu elektrycznego
29		Implementacja algorytmu sterowania układu ARNE w modelu fizycznym węzła wytwórczego
30		Opracowanie dystrybucyjnego transformatora hybrydowego (DTH) jako aktywnego elementu nowoczesnych systemów Smart Grid

Aktualnie prace badawcze prowadzone w laboratorium LINTE² obejmują również realizację 8 prac doktorskich, w tym 4 prac, w których pełni rolę promotora pomocniczego. Pod moją opieką zostało również zrealizowanych 7 prac dyplomowych magisterskich, dotyczących głównie opracowania nowych algorytmów sterowania wybranych elementów systemu elektroenergetycznego. Na uwagę zasługuje praca mgr. inż. Wojciecha Pawlickiego, dotycząca układu regulacji nadrzędnej elektrowni fotowoltaicznej i baterii akumulatorów, która zaowocowała publikacją na międzynarodowej konferencji naukowej International Conference on the European Energy Market (załącznik 4 pozycja [34]), oraz praca inż. Agaty Kozakowskiej dotycząca zagadnień koordynacji pracy regulatora transformatora blokowego i regulatora generatora. Ponadto praca ta została wyróżniona główną nagrodą w *konkursie na najlepszą pracę dyplomową inżynierską 2017* organizowanym przez Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Gdańsk.

Na bazie projektów badawczo-rozwojowych zrealizowanych w laboratorium LINTE² powstało również kilka publikacji, których jestem współautorem, pokazujących potencjał badawczy laboratorium (załącznik 4 pozycje [7], [34], [36], [49], [54]).

Badania naukowe prowadzone w laboratorium LINTE², którymi kierowałem, doprowadziły do opracowania i wdrożenia nowych algorytmów regulacji baterii akumulatorów litowo-jonowych umożliwiających pracę baterii jako obiektu regulacji napięcia i częstotliwości, układów regulacji nadrzędnej koordynujących pracę baterii akumulatorów oraz elektrowni fotowoltaicznej, regulatora układu UPFC uwzględniającego skoordynowane oddziaływanie pomiędzy częścią szeregową i równoległą. Wprowadzono także rozwiązania zwiększające funkcjonalność systemu SCADA.

Szczegółowe informacje dotyczące wszystkich uzyskanych przez mnie osiągnięć przedstawiłem w załączniku nr 4, *Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy z instytucjami naukowymi i o działalności popularyzującej naukę.*