



POLITECHNIKA LUBELSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**OCENA MOŻLIWOŚCI DYNAMICZNEJ IDENTYFIKACJI
PARAMETRÓW ZWARCIOWYCH W WĘZLE SIECI
ELEKTROENERGETYCZNEJ**

mgr inż. Robert Jędrychowski

Promotor: dr hab. inż. Piotr Kacejko, profesor PL

Recenzenci: dr hab. inż. Jan Iżykowski

dr hab. inż. Andrzej Wac-Włodarczyk, profesor PL

Lublin 2004 r.

1 Wstęp – sformułowanie celu i tezy pracy

Prawidłowa eksploatacja systemu elektroenergetycznego, jak również jego projektowanie i planowanie wymaga posiadania wiarygodnych informacji dotyczących wartości prądów zwarcia i innych wielkości zwarciovych charakteryzujących sieć przesyłową, sieć 110 kV oraz sieci średniego i niskiego napięcia. Podstawowy problem to identyfikacja przekroczeń dopuszczalnych parametrów zwarciovych aparatury łączeniowej, szyn zbiorczych oraz przewodów, skutkująca koniecznością niedopuszczania do określonych konfiguracji ruchowych systemu, wymianą aparatury lub stosowaniem innych sposobów ograniczania prądów zwarcia. Kolejne ważne zagadnienie to dobór nastawień urządzeń automatyki zabezpieczeniowej zapewniający prawidłową identyfikację stanu zakłóceniewego i eliminację uszkodzonych elementów systemu. Dalsze zagadnienia, to oszacowanie zagrożeń związanych z ochroną przeciwporażeniową na stacjach i terenach wokół nich oraz pod liniami napowietrznymi, jak również spełnienie wymagań partnerów zagranicznych odnośnie wymiany informacji o wielkościach zwarciovych. Jeszcze inny problem to ocena działania automatyki zabezpieczeniowej i tworzenie scenariuszy zdarzeń dla analiz poawaryjnych.

W sytuacji, w której infrastruktura systemu elektroenergetycznego służy do realizacji transakcji handlowych zawieranych na rynku energii, istotne jest prawidłowe określenie ograniczeń technicznych związanych z realizacją tego zadania. Problem polega na tym, aby ograniczeń tych nie formułować w sposób zbyt restrykcyjny (wiąże się to ze stratami finansowymi), ale również by ich nie lekceważyć, bo doprowadzi to do awarii systemowej, a w efekcie do jeszcze większych strat. Problematyka zwarciowa bezpośrednio i pośrednio odgrywa istotną rolę w definiowaniu ograniczeń technicznych określanych dla rynku energii.

Dane wejściowe do obliczeń zwarciovych dzielą się na kilka grup. Podstawowa grupa to model topologiczny odpowiadający stanowi normalnemu rozpatrywanej sieci. Musi być on jednak uzupełniony charakterystycznymi danymi dotyczącymi źródeł wytwórczych na różnym poziomie napięcia (impedancje generatorów, dane transformatorów blokowych sposób ich uziemienia), transformatorów sprzęgających sieci 400, 220 i 110 kV (modele zerowe), impedancji wzajemnych linii sprzężonych (złożone układy linii dwutorowych szczególnie w aglomeracjach miejskich) oraz uziemień punktów gwiazdowych transformatorów 110/SN kV. Fakt rozproszenia przestrzennego sieci jest tu znaczący i im dalej od źródeł informacji tym trudniej o zapewnienie aktualności i wiarygodności danych zwarciovych.

Oferta rynkowa w zakresie oprogramowania do wyznaczania wielkości zwarciovych jest stosunkowo bogata [6]. Problem jednak polega nie tylko na zakupieniu stosownego programu, ale na wypracowaniu mechanizmów jednolitego posługiwania się nim we wszystkich jednostkach energetyki związanych z eksploatacją i planowaniem rozwoju systemu, czyli w PSE S.A. i spółkach terenowych (PSE Centrum, Wschód, Zachód, Południe i Północ), spółkach dystrybucyjnych oraz w specjalistycznych biurach projektów.

Można więc stwierdzić, że w praktyce sytuacja związana z możliwością szybkiego uzyskania wyników obliczeń zwarciovych jest nieco paradoksalna: opracowane są teoretyczne podstawy obliczeń komputerowych dla sieci liczących nawet kilka tysięcy węzłów [6] oraz istnieją dopasowane do ich wymagań metody numeryczne, jednostki energetyki posiadają najnowszej generacji komputery, technologia baz danych i sieci komputerowych umożliwia modelowanie rozległych sieci elektroenergetycznych i wymianę informacji o modelach, czasopisma fachowe oferują cyklicznie co najmniej kilkanaście pakietów obliczeniowych wyposażonych w rozbudowane funkcje zwarciove, a w praktyce nie można być pewnym, czy uda się szybko uzyskać wiarygodną i dokładną informację o wartościach wielkości zwarciovych w interesującym nas miejscu sieci.

Wyjaśnienie tego stanu rzeczy jest trudne, ale ogólnie można stwierdzić, że rozwiązanie zagadnienia leży w odpowiednim zorganizowaniu „logistyki zwarciowej”, która pomogłaby w przewyżczeniu trudności wywołanych „efektem skali” (wielkość modeli, rozległość sieci, decentralizacja organizacyjna).

Jeśli nawet przyjąć, że przy odpowiednim zaangażowaniu „sił i środków” problemy leżące w sferze organizacyjnej modelowania wielkich sieci można rozwiązać, to pojawiają się jednak inne wyzwania, które wymagają nowego spojrzenia. Chodzi mianowicie o instalowane obecnie na stacjach energetycznych urządzenia, które dla prawidłowego funkcjonowania muszą posiadać zadaną jako

parametr wewnętrzny wartość impedancji zwarciowej węzła sieci Z_K , powiązaną z prądem zwarcia trójfazowego wzorem

$$I_K'' = \frac{cU_{nf}}{Z_K} \quad (1.1)$$

Urządzenia te, to niektóre typy zabezpieczeń, lokalizatory zwarć, rejestratory zakłóceń, urządzenia energoelektroniczne zaliczane do grupy FACTS (systemy przesyłu elastycznego), różnego rodzaju kompensatory i filtry przeciwzakłóceń. Dla tych urządzeń, nie do zaakceptowania jest formuła działania, w której wobec zmiany parametrów sieci, uprawniony pracownik (który najczęściej dojeżdża do stacji po pewnym czasie) ręcznie (na podstawie obliczeń wykonanych wcześniej „w centrali” przez specjalistyczną komórkę organizacyjną) dokona odpowiednich zmian nastawień. Nie jest także satysfakcjonująca formuła „ręcznego” korygowania nastawienia, ale przy wykorzystaniu zdalnego sterowania, poprzez sieć telemechaniki energetycznej, choć niewątpliwie góruje nad poprzednią. Docelowo, praca omawianych urządzeń powinna polegać na samoczynnym wykryciu zmiany parametru zwarciowego (tak jak wspomniano chodzi najczęściej o impedancję zwarciową Z_K) i całkowicie samoczynnym (adaptacyjnym) skorygowaniu wartości nastawionej na urządzeniu.

Przy zastosowaniu tradycyjnego (obliczeniowego) podejścia do wyznaczania wielkości zwarciowych można sobie wyobrazić dwa sposoby rozwiązania przedstawionego problemu:

- **scentralizowany** - polega na śledzeniu stanu systemu przez komputer operatorski realizujący funkcje określane jako SCADA, każdorazowe wykonywanie obliczeń zwarciowych (dla pełnego modelu sieci) po wystąpieniu zmiany topologicznej, sprawdzenie czy zmianie tej towarzyszy istotna zmiana prądu zwarcia (impedancji zwarciowej) i jakiego węzła ona dotyczy; jeśli sprawdzenie wypadnie pozytywnie następuje przesłanie nowej wartości parametru do odpowiedniego węzła (za pomocą systemu telemechaniki), a w węźle ma miejsce automatyczna korekta nastawienia urządzenia;
- **rozproszony** – polega na określeniu dla każdego węzła, w którym zainstalowane jest urządzenie omawianego typu, zastępczego, zredukowanego modelu sieci, w którym w sposób dokładny modeluje się tylko najbliższe otoczenie; jako istotną uznaje się zmianę topologii zachodzącą lokalnie i rejestrowaną przez układ telemechaniki stacyjnej; po wystąpieniu takiej zmiany przeprowadzane są samoczynnie obliczenia dla niewielkiego modelu sieci, wyliczony parametr zwarciowy służy do automatycznej korekty nastawienia.

Pierwszy sposób (scentralizowany) byłby trudny do praktycznej realizacji z kilku przyczyn. Po pierwsze krajowa sieć elektroenergetyczna nie jest jeszcze w wystarczającym stopniu objęta telemechaniką. Możliwe jest przy wykorzystaniu systemów typu SCADA śledzenie stanu sieci przesyłowej (400 i 220 kV), jak też śledzenie stanu sieci 110 kV z poziomu obszarowych dyspozycji mocy. Nie ma jednak możliwości objęcia obserwacją całego systemu (sieć krajowa 400, 220 i 110 kV nie jest w pełni obserwowalna). Po drugie komputerowy system czasu rzeczywistego zainstalowany w KDM (o nazwie *Sinaut Spectrum*) nie przewiduje automatycznego wykonywania obliczeń zwarciowych. Jest to zrozumiałe, trudno bowiem obciążać go złożonym zadaniem obliczeniowym, w sytuacji gdy szczególnie w warunkach awarii ma on do wykonania szereg innych zadań związanych z natychmiastowym przetwarzaniem danych. I wreszcie po trzecie, w wielu przypadkach charakter powiązań centrum dyspozytorskiego jest jednokierunkowy (od obiektu do centrum).

Realizacja drugiego sposobu (lokalne obliczenia zwarciowe) wydaje się bardziej realna i jest przedmiotem rozważań w części niniejszej rozprawy. Wymaga jednak wprowadzenia do układu sterowania i kontroli danej stacji, stosunkowo złożonego programu obliczeniowego. Procedura taka nie ma odpowiednika w dotychczasowej praktyce lokalnego przetwarzania danych i sygnałów, większość stosowanych lokalnie algorytmów ma (w sensie numerycznym) prymitywną postać (sekwencja prostych działań, podstawień i pętli). Trzeba pamiętać bowiem, że nawet dla sieci liczącej kilka węzłów trzeba zastosować programy o dużym stopniu złożoności, aby szybko uzyskać wynik obliczeń. Można się także spodziewać oporu ze strony producentów układów automatyki stacyjnej, dla których wprowadzenie dodatkowego i złożonego układu obliczeniowego jest dodatkową komplikacją.

Wreszcie w sytuacji zmiany w układzie zewnętrznym (zredukowanym) model musi zostać uaktualniony – dla utrzymania dokładności obliczeń.

W świetle sygnalizowanych problemów nasunęło się więc fundamentalne pytanie: czy w celu uzyskania informacji o aktualnej wartości impedancji zwarciowej charakteryzującej węzeł sieci (lub innego parametru zwarciowego) konieczne jest w ogóle wykonywanie klasycznych obliczeń zwarciowych, takich jakie wykonuje się w trybie „off line”? Odpowiedź na to pytanie już blisko 40 lat temu sformułował profesor M. Cegielski [2] udowadniając, że możliwe jest wyznaczanie impedancji zwarciowych na podstawie wyników pomiarów odpowiednich wielkości elektrycznych mierzonych w węźle sieci elektroenergetycznej. Praktyczna realizacja idei prof. Cegielskiego oraz Jego współpracowników, przy wykorzystaniu analogowej techniki pomiarowej napotykała jednak na trudności związane ze stochastycznym charakterem zmian mierzonych napięć i prądów.

Doświadczenia autora rozprawy związane z analizą zwarciową wskazały, że wyczuwany intuicyjnie i potwierdzany w praktyce związek pomiędzy impedancją zwarciową węzła sieci a zmianami topologicznymi w jego otoczeniu, jak też reakcja napięcia w węźle na zmiany obciążenia pozwoliły na zaproponowanie oryginalnej, hybrydowej metody, w której połączono zalety metod obliczeniowych (ale bez wykonywania obliczeń) z prostotą metody pomiarowej. Spoiwem pozwalającym na praktyczną realizację tej metody jest algorytm decyzyjny wykorzystujący sztuczną sieć neuronową (ANN).

Idea zastosowania metod sztucznej inteligencji do rozwiązania problemu technicznego powstaje najczęściej wtedy, gdy obserwuje się jak doświadczone osoby potrafią dokonywać oszacowania pewnych wielkości bez wykonywania skomplikowanych obliczeń, jedynie na podstawie obserwacji zjawisk i porównywaniu ich ze zgromadzoną (w swych zasobach pamięci mózgowej) bazą wiedzy. Jak wynika z tysięcy efektywnych aplikacji techniki ANN dzięki prawidłowo zorganizowanemu procesowi uczenia, oprogramowanie imitujące proces decyzyjny człowieka może rozwiązywać problemy obliczeniowe nie identyfikując modelu matematycznego danego procesu lub urządzenia. Nie ulegało wątpliwości, że jako bazę do tak rozumianego wnioskowania o zmianach wartości wielkości zwarciowych można przyjąć dwie grupy informacji:

- informację o zmianach struktury sieci, ze szczególnym uwzględnieniem sąsiedztwa węzła, dla którego przeprowadzana jest ocena – wszelkie podziały sieci i wyłączenia elementów odpowiadają wyczuwanemu intuicyjnie wzrostowi impedancji zwarciowej węzła,
- reakcję napięcia węzła na zmiany mocy obserwowane na jednej z linii odchodzących od tego węzła, informują one pośrednio o wartości impedancji zwarciowej - im zmiany są mniej zauważalne tym mniejsza jest wartość omawianej impedancji.

Na podstawie niniejszych rozważań przyjęto jako cel pracy określenie metody, dzięki której na podstawie sygnałów dostępnych w stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia możliwe byłoby monitorowanie w czasie rzeczywistym (lub też zbliżonym do rzeczywistego, nazwano ten sposób identyfikacji - *identyfikacją dynamiczną*) jej podstawowych parametrów zwarciowych. Wychodząc od znanych metod macierzowych zaadaptowanych do zastosowania lokalnego, zaproponowano alternatywne podejście, formułując następującą tezę:

Teza : Dzięki wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych, na podstawie analizy dostępnych lokalnie sygnałów dwustanowych i analogowych, możliwa jest dynamiczna identyfikacja zmian wartości parametrów zwarciowych węzła sieci elektroenergetycznej.

Prowadząc badania dla krajowej sieci elektroenergetycznej 400, 220 i 110 kV wykorzystano jej rzeczywiste parametry, uzyskane dzięki uprzejmości i za zgodą Departamentu Usług Operatorskich przedsiębiorstwa Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. Znacząca część pracy została wykonana w ramach finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji projektu badawczego promotorskiego PB 4T10B04124.

2 Analiza zmian wielkości zwarciowych

System elektroenergetyczny jest zbiorem elementów połączonych ze sobą i przeznaczonych do wytwarzania i rozdziału energii elektrycznej. Wykonanie obliczeń zwarciowych wymaga stworzenia modelu matematycznego opisującego sieć tego systemu. Do wykonania obliczeń zwarciowych konieczne jest modelowanie takich elementów jak generatory, transformatory, linie napowietrzne i kablowe, dławiki oraz silniki synchroniczne i kompensatory [5], [6]. Elementy te

modelowane są w postaci czwórników lub dwójników. Nie modeluje się w sposób „jawny” urządzeń łączeniowych, ale mają one bezpośredni wpływ na topologię sieci, czyli na sposób połączenia poszczególnych elementów.

Czwórniki opisujące elementy systemu łączy się tak, aby odpowiadały połączeniu elementów sieci elektroenergetycznej. Otrzymuje się schemat zastępczy sieci, a także zbiór równań odpowiadających prawom Kirchhoffa. Jedną z metod zapisu tych równań jest metoda potencjałów węzłowych najczęściej wykorzystywana w obliczeniach zwarciovych. Równania metody mają następującą postać

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \vdots \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_j \\ \vdots \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \cdots & \underline{Y}_{1i} & \underline{Y}_{1j} & \cdots & \underline{Y}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \underline{Y}_{i1} & \cdots & \underline{Y}_{ii} & \underline{Y}_{ij} & \cdots & \underline{Y}_{in} \\ \underline{Y}_{j1} & \cdots & \underline{Y}_{ji} & \underline{Y}_{jj} & \cdots & \underline{Y}_{jn} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{n1} & \cdots & \underline{Y}_{ni} & \underline{Y}_{nj} & \cdots & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \vdots \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_j \\ \vdots \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

w którym n jest liczbą węzłów w sieci, $\underline{U}_i$ - oznacza napięcie węzła i , $\underline{I}_i$ - prąd węzła i .

Admitancja własna węzła $\underline{Y}_{ii}$ zawiera sumę admitancji przyłączonych do tego węzła, w tym również gałąź poprzeczną $\underline{y}_{iN}$. Można ją wyrazić następującym wzorem

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{y}_{iN} + \sum_{j \neq i}^n \underline{y}_{ij} \quad (2.2)$$

Admitancja wzajemna $\underline{Y}_{ij}$ jest równa wartości admitancji gałęzi łączącej dwa węzły, wziętej ze znakiem przeciwnym

$$\underline{Y}_{ij} = -\underline{y}_{ij} \quad (2.3)$$

Na podstawie powyższych wzorów można sformułować właściwość macierzy węzłowej (2.4) mówiącą o tym, że suma elementów w wierszu tej macierzy jest równa admitancji gałęzi poprzecznej. Dla węzłów nie posiadających gałęzi poprzecznych wartość ta jest równa zero. Admitancja elementu łączącego węzeł i z węzłem odniesienia N wynosi

$$\underline{Y}_{iN} = \underline{Y}_{ii} - \sum_{j \neq i}^n \underline{y}_{ij} = \underline{Y}_{ii} + \sum_{j \neq i}^n \left(-\underline{y}_{ij} \right) = \sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij} \quad (2.4)$$

Równanie (2.1) można zapisać jako

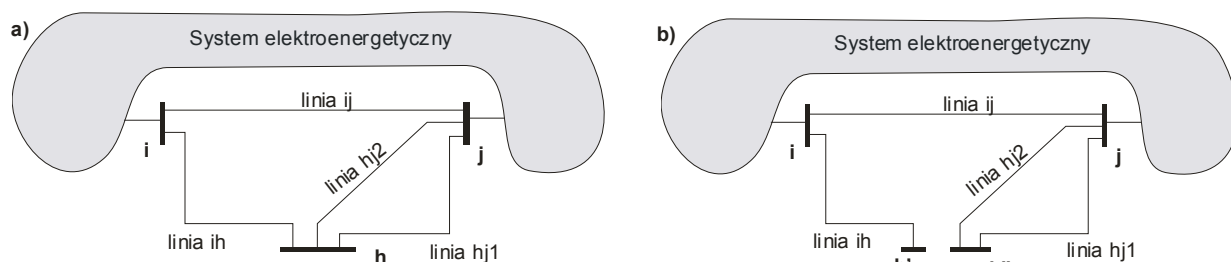
$$\mathbf{I} = \mathbf{YU} \quad (2.5)$$

gdzie: $\mathbf{I}$ - wektor prądów węzłowych, $\mathbf{U}$ - wektor napięć węzłowych, $\mathbf{Y}$ - macierz admitancyjna węzłowa.

W celu przybliżenia sposobu tworzenia macierzy admitancyjnej opisującej model sieci systemu elektroenergetycznego rozpatrzono jego fragment z wyróżnionymi trzema rozdzielniami (węzłami)¹ (rys. 2.1a). Model ten posłużył również do zobrazowania w formie graficznej wpływu wykonywanych operacji topologicznych (rys. 2.1b). Mimo, że rozpatrywano ściśle zdefiniowany fragment systemu elektroenergetycznego może być on traktowany jako przypadek ogólny.

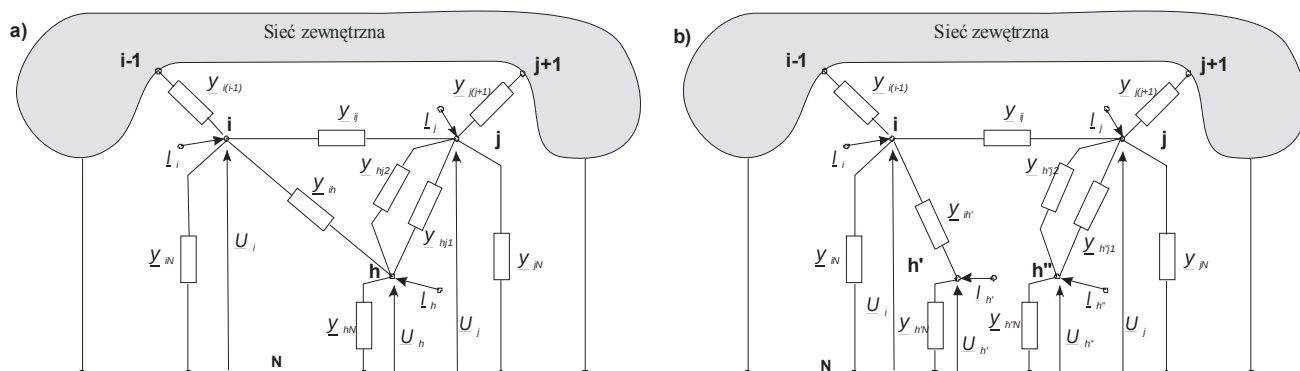
¹ Każda rozdzielnia sieci odpowiada węzłowi w modelu sieci, są jednak takie węzły, które nie odpowiadają rzeczywistym rozdzielniom.

Z systemu elektroenergetycznego wyodrębniono fragment, składający się z trzech rozdzielni i , j oraz h . Założono, że rozdzielnie te wpięte są do sieci WN i połączone liniami napowietrznymi jednotorowymi, dlatego też linie zostały zamodelowane jako czworniki posiadające gałęzie poprzeczne.



Rys. 2.1. Fragment systemu elektroenergetycznego a) z zamkniętym sprzęgłem w stacji h , b) z otwartym sprzęgłem w stacji h

Dla uproszczenia rozważań rozpatrywano fragment sieci rozpięty pomiędzy węzłami odpowiadającymi rozdzielniom z poprzedniego rysunku oraz węzłem odniesienia. Węzły $i-1$ oraz $j+1$ stanowią połączenie z pozostałą częścią sieci zewnętrznej, pominiętą w tych rozważaniach (rys. 2.2a). Gałęzie o admitancjach y_{ij} , y_{ih} , y_{hj1} , y_{hj2} są gałęziami wzdłużnymi łączącymi węzły i, j, h . Gałęzie o admitancjach y_{iN} , y_{jN} oraz y_{hN} są gałęziami poprzecznymi. Pozostałe dwie gałęzie o admitancjach $y_{(i-1)i}$ i $y_{j(j+1)}$ stanowią połączenie z siecią zewnętrzną.



Rys. 2.2 Model sieci rozpiętej między węzłami i, j, h oraz węzłem odniesienia N z uwzględnieniem a) załączonego sprzęgła b) wyłączonego sprzęgła

Zmiany zachodzące w topologii sieci elektroenergetycznej mogą w różnym zakresie wiązać się ze zmianami w modelu sieci oraz macierzy admitancyjnej węzłowej $\underline{Y}$.

Rozważono przypadek zdarzenia polegający na otwarciu wyłącznika sprzęgłowego (odpowiadającego w modelu podziałowi węzła) zachodzący w zamodelowanym fragmencie sieci elektroenergetycznej (rys. 2.1b).

Jeśli zmiana topologii polegała na otwarciu wyłącznika sprzęgłowego w rozdzielni h to w macierzy $\underline{Y}$ wystąpiły następujące zmiany:

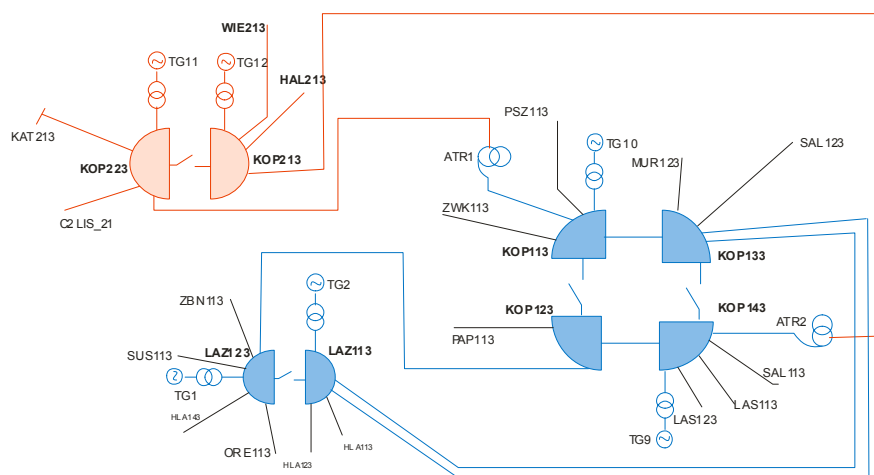
- rozdzielnia, w której sprzęgło zostało wyłączone podzielona została na dwa niezależne systemy szyn, a w modelu opisującym sieć węzeł h zastąpiony został przez węzły h' oraz h'' (rys. 2.2b);
- uległy zmianie wartości admitancji wzajemnych węzłów przyłączonych do węzła podzielonego;
- uległ zmianie rozmiar macierzy admitancyjnej opisującej sieć oraz rozmiar wektorów węzłowych prądów i napięć.

Zaznaczyć należy, że dokonując podziału węzła h na węzły h' oraz h'' zmieniono również oznaczenia admitancji poszczególnych elementów sieci tak, aby odpowiadały nowemu opisowi. Jak nietrudno zauważyć słuszne pozostają następujące zależności

$$\begin{aligned}
\underline{y}_{ih'} &= \underline{y}_{ih} \\
\underline{y}_{h''j1} &= \underline{y}_{hj1} \\
\underline{y}_{h''j2} &= \underline{y}_{hj2} \\
\underline{y}_{h'N} + \underline{y}_{h''N} &= \underline{y}_{hN}
\end{aligned}
\tag{2.6}$$

Takie i inne zmiany zachodzące w modelu matematycznym muszą zostać odwzorowane w programach komputerowych wykorzystywanych do obliczeń zwarciovych. Wymaga to zastosowania odpowiednich metod matematycznych pozwalających na szybkie wprowadzanie zmian w modelu sieci.

W analizach zwarciovych sieci Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy zwrócono uwagę na takie stacje, w których monitorowanie warunków zwarciovych byłoby szczególnie wskazane. Wybrano dwie stacje KSE, w których wskazane byłoby stałe monitorowanie wielkości zwarciovych, a które charakteryzują się odmiennymi warunkami pracy. Różne były również kryteria, którymi kierowano się przy ich wyborze.

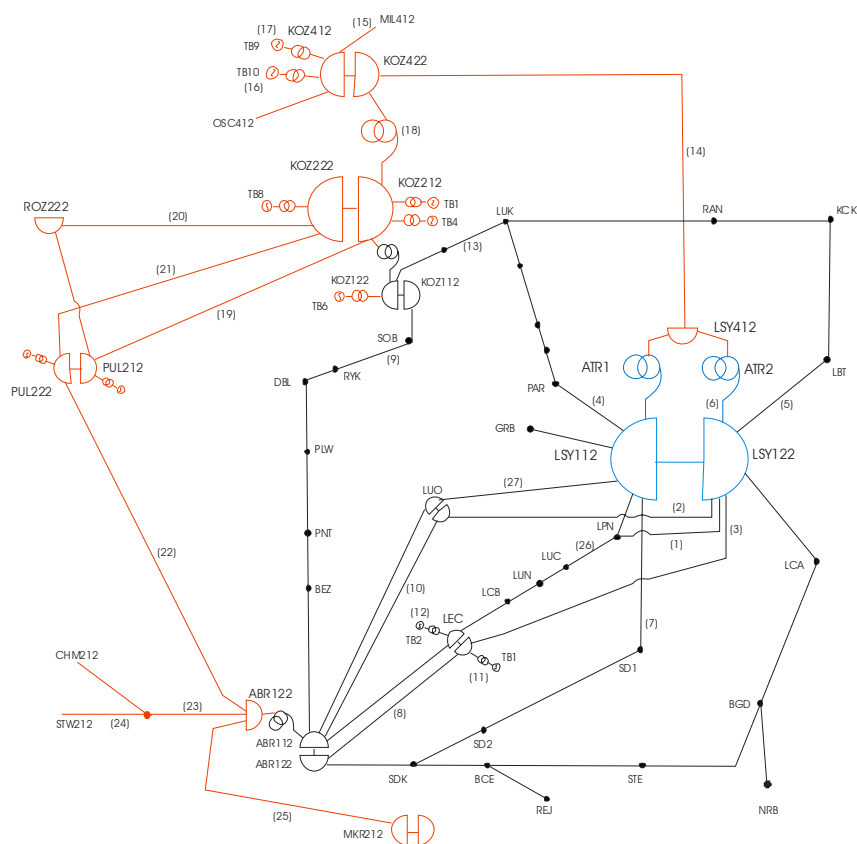


Rys. 2.3. Schemat układu normalnego dla stacji KOP – LAZ

Pierwszą stacją jest stacja systemowa o nazwie kodowej KOP (rys. 2.3), pracująca na napięciu górnym 220 kV oraz napięciu dolnym 110 kV. Rozdzielnie górnego i dolnego napięcia połączone są dwoma autotransformatormi o mocy 160 MVA. Dodatkowo do rozdzielni KOP 110 kV przyłączona jest rozdzielnia LAZ 110 kV. Połączenie to wykonane jest liniami o niewielkich długościach (ok. pół kilometra). Linie S332 (KOP133-LAZ113) i S333 (KOP133-LAZ113) oraz S00D (KOP123-LAZ113), którymi połączone są te rozdzielnie posiadają według danych PSE reaktancję 0.2 Ω. Dlatego też należy rozważać ten układ jako całość, tak też jest on traktowany w KSE, gdyż jego podstawowym zadaniem jest wyprowadzenie mocy z pobliskiej elektrowni Łaziska. Dodatkowo rozdzielnia ta zapewnia, poprzez autotransformatory, powiązanie sieci przesyłowej 220 kV z siecią rozdzielczą 110 kV KSE oraz zapewnia zasilanie stacji 110/SN poprzez piętnaście linii 110 kV wychodzących z rozdzielni KOP oraz LAZ. Układ ten charakteryzuje zagrożenie przekraczaniem dopuszczalnych wielkości zwarciovych.

Drugą stacją o nazwie kodowej LSY wybrano ze względu na jej położenie na styku dwóch fragmentów sieci elektroenergetycznej zarządzanych przez różnych operatorów. Uwzględniając uwarunkowania własnościowe w krajowej elektroenergetyce, przyjęto, że część informacji topologicznych (dwustanowych) niezbędnych do prawidłowej identyfikacji wartości wielkości zwarciovych jest niedostępna lub trudna do uzyskania dla danego dyspozytora zarządzającego fragmentem sieci elektroenergetycznej. Dlatego, opisano fragment sieci elektroenergetycznej, w której wyróżniana jest część obserwowalna (dostępne informacje topologiczne) i nieobserwowalna (brak informacji topologicznych). W sieci tej pracuje rozdzielnia LSY 110 kV należąca do spółki

dystrybucyjnej zarządzającej siecią 110 kV oraz siecią rozdzielczą SN. Sieć ta charakteryzuje się niewielkim stopniem złożoności, a także bardzo silnym uzależnieniem od sieci przesyłowej (zewnętrznej, nieobserwowalnej) 220 i 400 kV. Większość energii dostarczana jest do niej ze źródeł pracujących w sieci zewnętrznej należącej do PSE S.A.



Rys. 2.4. Fragment sieci KSE z rozdzielnią LSY

Wpływ operacji topologicznych wykonywanych w sąsiedztwie rozpatrywanych rozdzielni na wartości wielkości zwarciovych w wybranym węźle prezentują kolejne przypadki obliczeń. Poszczególne kolumny tabel opisujących te warianty zawierają następujące elementy wyznaczone zgodnie z normą IEC 60909:

- nazwę węzła;
- moc zwarciovą węzła;
- prąd zwarcia trójfazowego;
- prąd udarowy.

Wszystkie wyniki uzyskano przy wykorzystaniu programu zwarciovego SHORTS opracowanego przez zespół pracowników Politechniki Lubelskiej dla potrzeb jednostek energetyki [6]. Działanie tego programu opiera się na opisie sieci elektroenergetycznej w postaci macierzy admitancyjnej, a wszystkie zmiany zachodzące w topologii sieci wymagają zmiany elementów tej macierzy. Model macierzowy został pośrednio wykorzystany do osiągnięcia wyników odzwierciedlających parametry zwarciovie w wybranym punkcie sieci.

Jako pierwszy rozpatrzono wariant 1, w którym wszystkie elementy binarne mające wpływ na wartości zwarciovie w rozdzielni KOP pozostają zamknięte. Wariant ten jest dobrym punktem odniesienia dla pozostałych wyników obliczeń. Duże wartości prądów zwarciovych wynikają z pracy wszystkich źródeł w rozdzielniach KOP i LAZ na wspólne szyny. Impedancje linii łączących te stacje są niewielkie, a dodatkowo pracują one równolegle. Tym również można uzasadnić niewielką różnicę wartości prądów pomiędzy obiema rozdzielniami. Warto również zwrócić uwagę, że prądy te znacznie przekraczają poziom dopuszczalnych wartości prądów zwarciovych dla tych rozdzielni.

Tablica 2.1. Wyniki obliczeń dla wariantu 1

Załączone wszystkie elementy układu			
Węzeł	MOC	3F	i_p
	[MVA]	[kA]	[kA]
KOP113	9929	52,1	125,5
KOP123	9929	52,1	125,5
KOP133	9935	52,1	125,5
KOP143	9937	52,1	125,5
LAZ113	9851	51,7	123,7
LAZ123	9817	51,5	123,3

Aby przy takiej konfiguracji aparatura łączeniowa mogła działać poprawnie jej wytrzymałość powinna osiągnąć poziom 63 kA. Cechą charakterystyczną dla tego układu jest również to, że wykonywanie przełączeń linii, źródeł czy transformatorów pomiędzy poszczególnymi sekcjami w żaden sposób nie wpływa na wartość prądów zwarciovych.

W wariantcie drugim wyłączono wszystkie sprzęgła w rozdzielni KOP. Przykład modelu dla takiej operacji prezentuje rysunek 2.2 b. W ten sposób uzyskano cztery węzły, z których dwa KOP123 i KOP133 łączą się poprzez linie napowietrzne z rozdzielnią LAZ oraz liniami do nich przyłączonymi z siecią 110 kV. Węzły KOP113 i KOP143 połączone są poprzez autotransformatory z rozdzielnią KOP 220 kV, do każdego z nich przyłączony jest generator oraz linie napowietrzne stanowiące połączenie z siecią rozdzielczą 110 kV.

W wariantcie tym widać wyraźne różnice wartości wielkości zwarciovych pomiędzy poszczególnymi węzłami. Węzły KOP123 i KOP133 posiadają zbliżone wartości poszczególnych rodzajów prądów zwarciovych. Ale na uwagę zasługuje przede wszystkim fakt, że maksymalna wartość prądu nie przekracza 32 kA.

Dla pozostałych dwóch węzłów widać, znaczące różnice pomiędzy wartościami mocy i prądów zwarciovych. Różnice te wskazują na odseparowanie węzła KOP113 i KOP143 od pozostałych węzłów rozdzielni KOP i rozdzielni LAZ. Głównym źródłem mocy zwarciovej są udziały pochodzące od generatorów i autotransformatorów.

Tablica 2.2. Wyniki obliczeń dla wariantu 2

Wyłączone sprzęgła podłużne i poprzeczne w rozdzielni KOP 110 kV			
Węzeł	MOC	3F	i_p
	[MVA]	[kA]	[kA]
KOP113	3638	19,1	45,1
KOP123	5789	30,4	67
KOP133	5935	31,1	68,2
KOP143	4564	24	57,1
LAZ113	6182	32,4	71,9
LAZ123	6183	32,4	71,9

Maksymalny prąd zwarciovej dla węzła KOP113 wynosi 22 kA, a dla węzła KOP143 wynosi 24 kA. Widać wyraźnie, że podział rozdzielni na niezależne węzły prowadzi do znacznego zmniejszenia wartości prądów zwarciovych w poszczególnych węzłach. Zmieniły się również wartości parametrów w węzłach rozdzielni LAZ. Choć widać wyraźny spadek wartości mocy zwarciovej i prądów w węzłach odpowiadających szynom tej rozdzielni w porównaniu

z wariantem 1, to jednak wartości te są najwyższe dla sześciu rozpatrywanych węzłów i wynoszą dla prądu do 35 kA. Wynika to z pracy tej rozdzielni z zamkniętym sprzęgłem, a przez to pracy na wspólnie szyny dwóch generatorów.

W kolejnych wariantach zaprezentowano wpływ operacji wykonywanych w sieci wewnętrznej (obserwowalnej) dla operatora rozdzielni LSY i zewnętrznej (nieobserwowalnej) będącej siecią przesyłową. Jako pierwszy rozpatrzono wariant 3, w którym wszystkie elementy zaznaczone na rys. 3.5 pozostają zamknięte. Wariant ten odpowiada podstawowemu układowi pracy sieci.

Tablica 2.3. Wyniki obliczeń dla wariantu 3

Załączone wszystkie elementy układu			
Węzeł	MOC	3F	i_p
	[MVA]	[kA]	[kA]
LSY112	5955	31,3	74,5

Wyniki uzyskane dla tego wariantu pokazują, że warunki zwarciovej w węźle LSY112 są dużo łagodniejsze w porównaniu z warunkami panującymi w rozdzielni KOP. Jednak celem obliczeń

przeprowadzonych dla tego węzła było pokazanie wpływu operacji topologicznych wykonywanych w sieci rozdzielczej 110 kV oraz w sieci przesyłowej.

Tablica 2.4. Wyniki obliczeń dla wariantu 4

Wyłączone ciągi linii ABR-LUO-LSY i ABR-LEC-LPN-LSY			
Węzeł	MOC	3F	i_p
	[MVA]	[kA]	[kA]
LSY112	5462	28,7	67,3

Wariant czwarty jest przykładem operacji topologicznych wykonywanych na liniach sieci wewnętrznej. Wyłączono dwa ciągi linii pomiędzy węzłami ABR i LSY. Ponieważ poprzez węzeł ABR

dostarczana jest moc zwarciova z sieci przesyłowej do sieci wewnętrznej wyłączenie dowolnego ciągu linii pomiędzy węzłem ABR, a LSY zmniejsza wartość mocy zwarciovej na szynach tego ostatniego. Jednak, ze względu na istnienie siedmiu takich ciągów, wyłączenie tylko jednego powoduje niewielkie zmiany wartości parametrów zwarciowych.

W wariancie piątym wyłączono linię 400 kV KOZ-LSY, którą dopływa moc zwarciova z rozdzielni KOZ. Węzeł LSY zasilany jest jedynie od strony sieci 110 kV.

Tablica 2.5. Wyniki obliczeń dla wariantu 5

Wyłączenie linii KOZ-LSY			
Węzeł	MOC	3F	i_p
	[MVA]	[kA]	[kA]
LSY112	4160	21,8	49,9

Taki układ zasilania węzła LSY sprawia, że wartości wielkości zwarciowych zmniejszyły się o 30% w porównaniu z wariantem 3. Gdy przy takiej topologii odłączone zostaną linie 110 kV łączące tę rozdzielnię z rozdzielnią ABR, wartości tych wielkości ulegną dalszemu zmniejszeniu.

Zaprezentowane obliczenia związane z obliczeniowym odwzorowaniem wpływu zmian topologicznych na wielkości zwarciove dobrze pokazują jak trudne zadanie może mieć operator sieci w przypadku konieczności częstego ich przeprowadzania. Metoda „ręcznego” modelowania może obfitować w częste pomyłki i przekłamania.

Dyspozytor zarządzający pracą sieci powinien posiadać narzędzia pozwalające na uzyskanie takich informacji przed podjęciem decyzji lub tuż po ich wykonaniu. Przydatność takich narzędzi sprawdza się zazwyczaj dopiero w sytuacjach awaryjnych, w których na skutek awarii w sieci elektroenergetycznej i zmian w jej topologii dyspozytor powinien w krótkim czasie podejmować właściwe decyzje o ewentualnych przełączeniach. Według informacji autora system taki (*Sinaut Spectrum*) posiada tylko Krajowa Dyspozycja Mocy. Jest to jednak system tylko informujący o wartościach wielkości zwarciowych w trybie „on-line”. Nie ma on możliwości zdalnego przesyłania informacji do rozdzielni w celu zmiany parametrów nastawianych aparatury zabezpieczeniowej i pomiarowej.

Ponieważ klasyczne programy zwarciove charakteryzują się dużą pracochłonnością w przypadku modelowania dużej liczby zmian w topologii sieci elektroenergetycznej, konieczne jest ich zoptymalizowanie tak, aby ograniczyć liczbę niezbędnych do wykonania operacji edycyjnych. Można również zautomatyzować proces wprowadzania zmian w modelu opisującym sieć elektroenergetyczną np. poprzez modyfikację danych wejściowych programu po każdorazowym wystąpieniu zmian w topologii tej sieci. Takie podejście wymaga za każdym razem tworzenia macierzy admitancyjnej od nowa, ale eliminuje ingerencję człowieka w proces edycji.

Tak więc, za najbardziej atrakcyjne, należy uznać rozwiązanie, w których człowiek zostaje całkowicie wyeliminowany z procesu kontroli wartości wielkości zwarciowych. Istnieją metody, których podstawową zaletą jest fakt pomiaru rzeczywistych wielkości elektrycznych. Wymaga to stosowania specjalnych modułów pomiarowych potrafiących wyznaczyć impedancję zwarcia dla danego węzła sieci elektroenergetycznej [2]. Ponieważ pomiar taki odbywa się w normalnych warunkach pracy systemu może być obarczony błędami wynikającymi z częstych zmian wartości mierzonych wielkości, konieczne jest zatem odpowiednie dobranie algorytmów pomiarowych tak, aby ograniczyć wielkość popełnianego błędu [1]. Drugą ważną cechą tego podejścia jest to, że uzyskany wynik obrazuje stan sieci tuż po wykonaniu danej operacji łączeniowej.

Inny sposób polega na identyfikowaniu wartości wielkości zwarciovej, metodami pomiarowymi, ale przy wsparciu ich wnioskowaniem opartym na metodach sztucznej inteligencji. Ta „inteligencja” jest konieczna, trzeba bowiem pamiętać, że ocena stanu zwarcia na podstawie wszelkich pomiarów związanych z normalnym stanem pracy jest oceną pośrednią. W dalszej części zaprezentowano metody wykorzystujące w tym celu sztuczne sieci neuronowe (ANN) i pozwalające na uzyskiwanie wartości wielkości zwarciovej w wybranych węzłach w trybie „on-line” bez wykorzystania klasycznych algorytmów obliczeniowych.

3 Zastosowanie techniki ANN do wyznaczania parametrów zwarciovych węzła sieci elektroenergetycznej przy wykorzystaniu sygnałów dwustanowych

Rozwiązaniem problemu dynamicznego wyznaczania wartości wielkości zwarciovych mogą być metody pozwalające na pominięcie modelowania sieci elektroenergetycznej oraz przekształceń macierzowych opisanych w rozdziale 2, niezbędnych do uzyskania wyniku. Jedną z takich metod są układy wykorzystujące w swych algorytmach decyzyjnych teorię sztucznych sieci neuronowych. Podstawą decyzji o zastosowaniu ANN do identyfikacji wielkości zwarciovych, były dwie przesłanki. Pierwsza to taka, że zastosowanie sieci neuronowej pozwala na pominięcie modelu matematycznego sieci elektroenergetycznej oraz jej rekonfiguracji po wystąpieniu zmian topologicznych. Druga to taka, że ze względu na równoległe przetwarzanie informacji, sieć neuronowa działa z dużą szybkością, stąd wynik może być uzyskiwany w czasie rzeczywistym.

Przyjęto założenie, że informacje na temat aktualnej topologii sieci elektroenergetycznej można wykorzystać jako sygnał wejściowy dla układu identyfikującego. Najbardziej naturalnym sposobem określenia czy dany element sieci elektroenergetycznej jest załączony, czy też nie, jest określenie stanu elementów binarnych (wyłączników) na jego końcach. Jednocześnie należy pamiętać, że poszczególne gałęzie mogą być przyłączone do ściśle określonych węzłów. W ten sposób stan, w jakim znajdują się poszczególne wyłączniki można wykorzystać do określenia topologii systemu. Na wyjściu takiego układu powinna być prezentowana wartość wybranej wielkości zwarciovej.

Sygnał wejściowy podawany na układ zawierał informacje opisujące tylko wyodrębnioną podsieć (fragment) KSE przedstawioną rys. 2.3. Pozostała część KSE, choć nie jest uwzględniona w sygnale wejściowym, wpływa jednak na wartość sygnału wyjściowego. Może ona zostać potraktowana jako źródło mocy zwarciovej, które poprzez linie graniczne zasilą opisaną podsieć. Ze względu na występowanie w sygnale wejściowym tylko danych topologicznych (binarnych) informacja o wpływie sieci zewnętrznej na rozpatrywaną podsieć zostanie przekazana dopiero w procesie uczenia ANN.

Sygnał wyjściowy przekazuje dane zwarciove opisujące wartość prądu zwarcia trójfazowego dla wybranego węzła rozdzielni KOP lub impedancji zwarcia w węźle LSY. Sygnał ten dla wytrenowanej sieci neuronowej powinien odpowiadać rzeczywistym wartościom uzyskanym w wyniku obliczeń wykorzystujących model macierzowy, przyjmowanych za wartości rzeczywiste.

Takie podejście do modelowania sygnału wejściowego i wyjściowego pozwala na pominięcie następujących informacji, które są niezbędne przy stosowaniu metod macierzowych. Do pomijanych informacji należą bowiem:

- modele matematyczne elementów,
- odwzorowania połączenia poszczególnych elementów,
- modelowanie zmian w połączeniu elementów.

Do wytrenowania sieci neuronowej przygotowano dane uzyskane z programu zwarciovej SHORTS. Można przyjąć, że wykorzystany do przygotowania danych treningowych model sieci elektroenergetycznej zapisany w postaci macierzy admitancyjnej wpływa pośrednio na wartości wag sieci neuronowej.

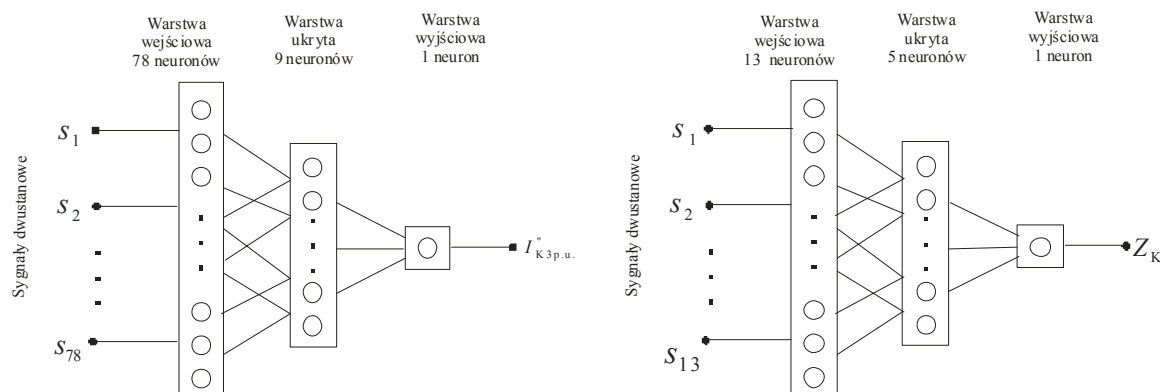
3.1 Wyznaczanie wartości prądów zwarciovych w wybranym węźle KSE

W wyniku analiz przeprowadzonych w celu określenia wpływu operacji topologicznych na wartości wielkości zwarciovych w węzłach układu KOP-LAZ ustalono, że należy uwzględnić stan 78 łączników. Wielkość ta wynikała z konieczności odwzorowania sprzęgieł i możliwości przełączania gałęzi pomiędzy różnymi sekcjami szyn, a także z konieczności modelowania wszystkich ciągów liniowych tworzących zewnętrzne połączenie pomiędzy poszczególnymi sekcjami szyn w rozdzielniach KOP-LAZ. Zgodnie z przyjętym założeniem sieć neuronowa wykorzystana do identyfikacji wartości zwarciovych zawiera 78 neuronów na wejściu.

Jako pierwszy przypadek rozpatrzono układ identyfikujący wartość prądu zwarcia trójfazowego w jednym węźle rozdzielni KOP. Sygnałem wyjściowym był prąd zwarcia trójfazowego I''_{K3} w węźle KOP113 w postaci znormalizowanej, czyli zawierający się w przedziale od 0 do 1, tj.

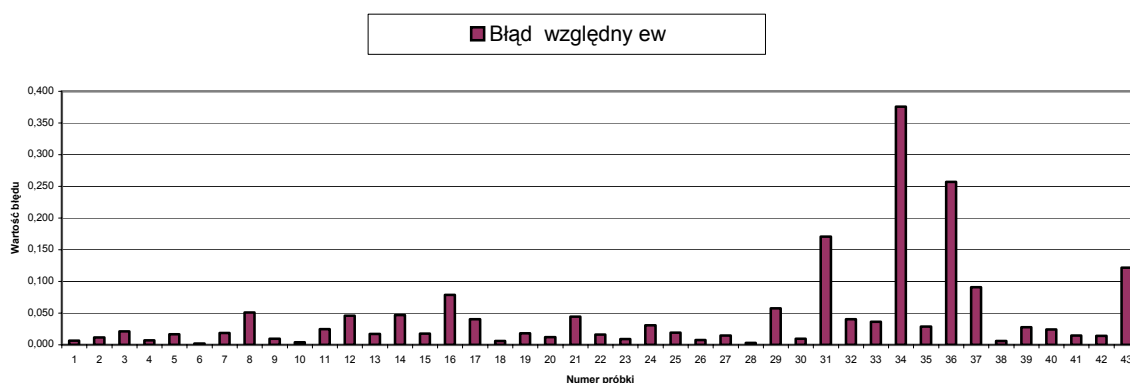
$$I_{K3p.u.}'' = \frac{I_{K3}''}{I_{K3max}''} \quad (3.1)$$

W przypadku identyfikowania wielkości zwarciovych dla jednego systemu szyn dobre wyniki osiągnięto dla sieci jednokierunkowej trójwarstwowej o strukturze i kierunku przepływu informacji przedstawionym na rys. 3.1a.



Rys. 3.1. Struktura i kierunek przepływu informacji w sieci wykorzystywanej do identyfikowania a) wartości prądu zwarcia trójfazowego w węźle KOP113, w której $\mathbf{S}[s_1, s_2 \dots s_{78}]$ jest wektorem sygnałów wejściowych dwustanowych b) wartości impedancji zwarcia węzła KOP113, w której $\mathbf{S}[s_1, s_2 \dots s_{13}]$ jest wektorem sygnałów wejściowych.

Sieć neuronowa zawiera jedną warstwę ukrytą składającą się z dziewięciu neuronów, której jako funkcję aktywacji zastosowano tangens hiperboliczny. W warstwie wyjściowej składającej się z jednego neuronu zastosowano jako funkcję aktywacji zależność liniową, której wartości mieszczą się w przedziale $\langle 0,1 \rangle$. Do symulacji pracy sieci wykorzystano oprogramowanie NeuroSolutions [7] odznaczające się dużą elastycznością przy modelowaniu sieci oraz przyjaznym dla użytkownika interfejsem. W procesie uczenia wykorzystany został algorytm BP ze współczynnikiem momentu, a także algorytm Quickprop [8], [10]. Jako kryterium oceny przebiegu tego procesu stosowano błąd MSE [7], [10]. W obu przypadkach uzyskano zbliżone wyniki końcowe.



Rys. 3.2. Wartości błędu e_w uzyskane dla danych testowych

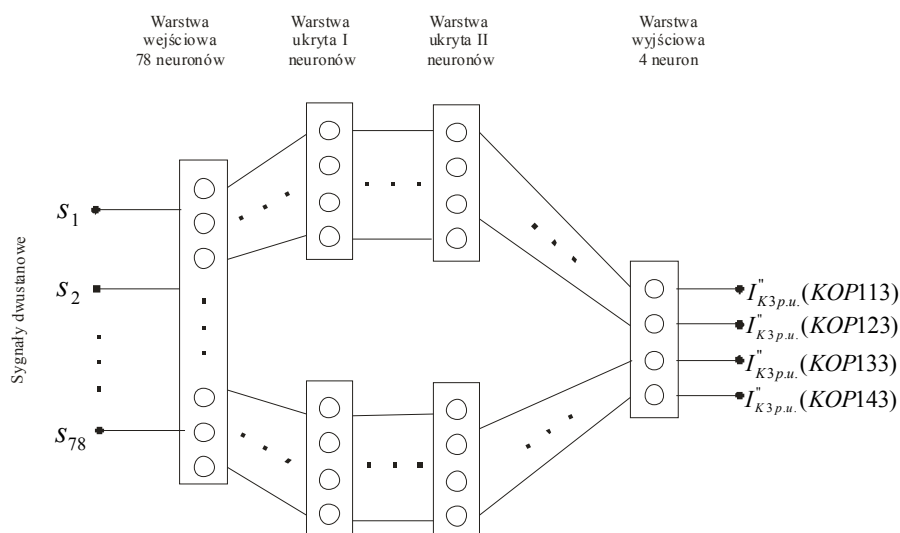
Wyniki zaprezentowane na rys. 3.2 pokazują błąd jaki popełnia sieć neuronowa gdy na wejściu podawane są dane testowe. Wprowadzona miara błędu pozwala porównać wyniki uzyskane dla poszczególnych próbek. Jak łatwo zauważyć dla większości zaprezentowanych przykładów wartość błędu e_w mieści się poniżej wartości 0,05, a dla 18 przypadków wartość ta nie przekracza

0,02. Cechą charakterystyczną przypadków, w których błąd ma wartość największą jest niewielka oczekiwana wartość prądu I_{K3}'' .

Analizując poszczególne przypadki wyłączeń opisanych w zbiorze testowym warto zaznaczyć, że dla większości operacji wykonywanych w sąsiedztwie węzła KOP113, a przez to mających największy wpływ na ten węzeł, sieć neuronowa nie popełniała znaczących błędów. Wyjątek stanowi przypadek nr 34, w którym na skutek wykonanych wyłączeń, identyfikowana w węźle wartość prądu zwarcia była niewielka, a przez to błąd e_w osiąga duże wartości.

Etapem końcowym symulacji było określenie czy możliwa jest identyfikacja wartości parametrów zwarciovych przy traktowaniu wszystkich systemów szyn rozdzielni KOP jako czterech oddzielnych węzłów. Przy takim założeniu na wyjściu sieci neuronowej powinny zostać zaprezentowane jednocześnie wartości czterech prądów I_{K3}'' dla wszystkich węzłów rozdzielni. Dane wyjściowe pozostały identyczne jak w poprzednio opisanych przypadkach.

Zastosowanie do rozwiązania tak zdefiniowanego zadania sieci jednokierunkowych trójwarstwowych nie przyniosło oczekiwanych rezultatów. Dopiero rozbudowanie sieci i zastosowanie drugiej równoległej części (modułu) przetwarzającej sygnał pozwoliło uzyskać satysfakcjonujące wyniki.



Rys. 3.3. Struktura sieci neuronowej dla identyfikowania wartości prądów I_{K3}'' dla wszystkich węzłów rozdzielni KOP, w której $\mathbf{S}[s_1, s_2 \dots s_{78}]$ jest wektorem sygnałów wejściowych dwustanowych

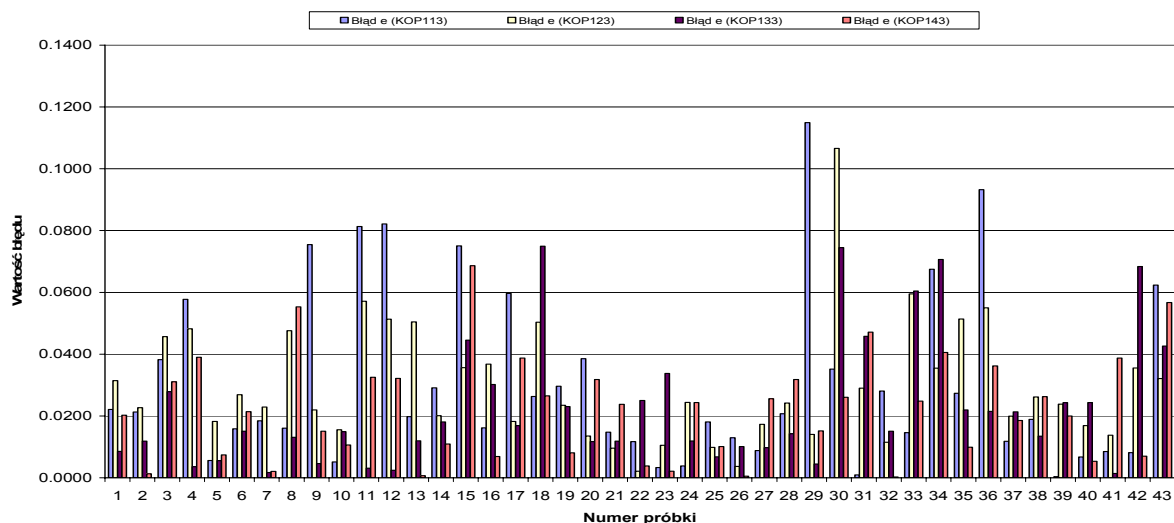
Na rys. 3.3. przedstawiono strukturę jednokierunkowej modularnej sieci neuronowej (*Modular Feedforward Network*) zawierającej dwie warstwy ukryte w każdym module. Do budowy sieci o takiej architekturze wykorzystano aplikację NeuroSolutions.

Przepływ informacji przez dwa niezależne moduły pozwala na indywidualne ustawienie właściwości dla każdego z nich. Można dowolnie modyfikować funkcje aktywacji neuronów, ilość neuronów w poszczególnych warstwach modułu oraz parametry metody uczenia dla każdego elementu sieci. Sama metoda uczenia jest ustalana dla całej sieci. Dla tego typu sieci neuronowych wykorzystywane są klasyczne metody uczenia sieci jednokierunkowych. Złożona struktura sieci nie zaburza przepływu informacji, a przez to mogą być stosowane wszystkie metody opisane w literaturze [10].

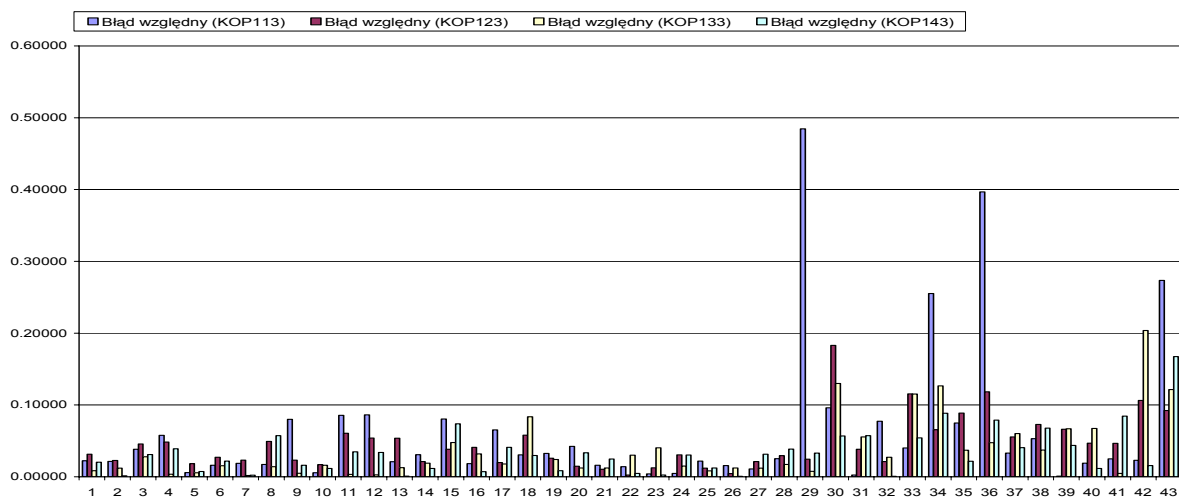
Dane zawarte na rys. 3.4. pokazują, że błąd będący różnicą pomiędzy wartością uzyskaną i oczekiwaną może przyjmować podobne wartości niezależnie od tego jak duży stopień złożoności ma operacja topologiczna opisana daną próbka.

Jednak jak wynika z rys. 3.5 popełniany błąd względny zależy w dużej mierze od wartości oczekiwanej. Dla tak skomplikowanego układu sieci neuronowej potwierdzają się obserwacje dokonane dla prostych sieci trójwarstwowych. Skomplikowane operacje topologiczne prowadzą do zmniejszenia wartości prądu I_{K3}'' , a przez to zwiększa się znacząco wartość błędu względnego e_w . Dodatkowo można zaobserwować duże zróżnicowanie w błędach popełnianych dla jednej próbki

danych wejściowych w poszczególnych węzłach. Problem ten jest szczególnie widoczny przy podziale rozdzielni na cztery niezależne węzły.



Rys. 3.4. Wartości błędu e uzyskane przy identyfikacji prądu I_{K3}'' we wszystkich węzłach rozdzielni KOP jednocześnie



Rys. 3.5. Wartości błędu e_w przy identyfikacji prądu I_{K3}'' we wszystkich węzłach jednocześnie

Jak pokazują dane umieszczone na rys. 3.5 mimo sporadycznego występowania błędów o znacznych wartościach, większość przypadków jest precyzyjnie identyfikowana przez układ zawierający sieć neuronową. Średnie wartości błędów przy jednoczesnej identyfikacji we wszystkich węzłach są tylko nieznacznie większe od błędów popełnianych przy identyfikacji w jednym węźle.

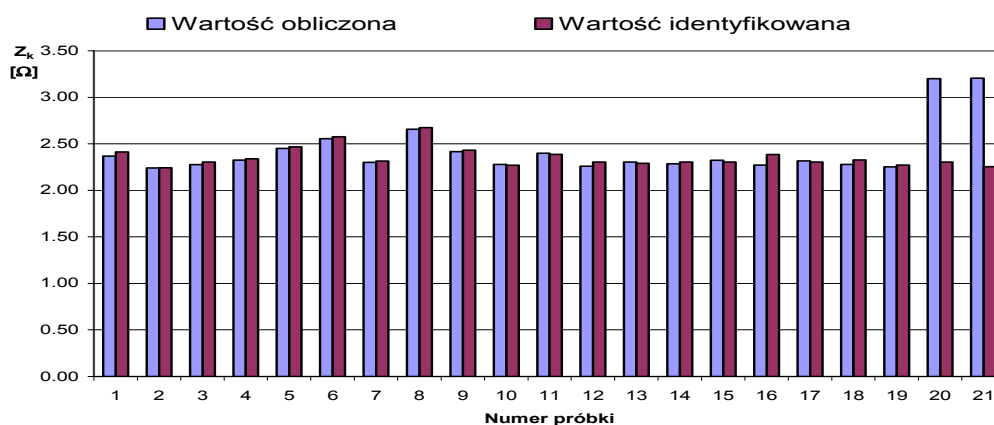
3.2 Identyfikacja impedancji zwarciowej przy niekompletnych danych dwustanowych

Wykonanie obliczeń i identyfikacji dla fragmentu sieci elektroenergetycznej zawierającego rozdzielnię LSY (rys. 2.4), miało odpowiedzieć na pytanie, jaki wpływ na wielkość błędu popełnianego przez ANN będzie miało pominięcie informacji topologicznych z sieci 220 kV i 400 kV. Sytuacja taka ma miejsce w związku z niekompatybilnością systemów telemechaniki i brakiem wymiany danych pomiędzy spółką dystrybucyjną, a firmą PSE S.A. zarządzającą siecią przesyłową 220, 400 kV.

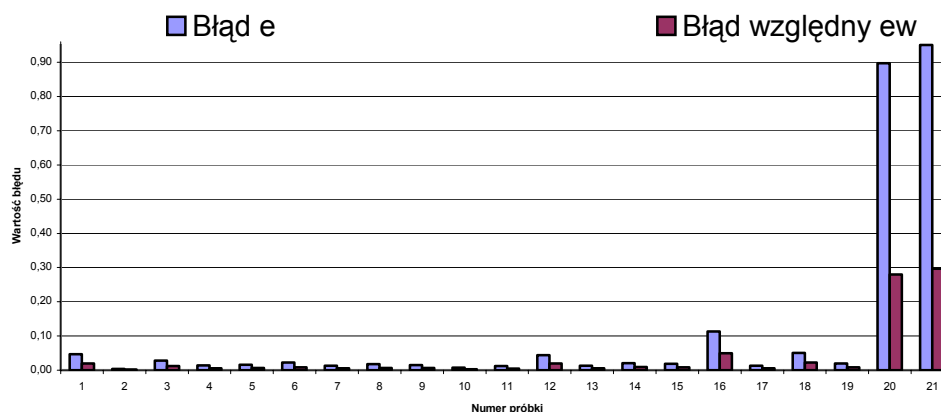
Układ identyfikujący oparty na ANN powinien gwarantować poprawne uzyskanie wartości impedancji zwarciowej węzła dla operacji topologicznych wykonywanych w sieci wewnętrznej (obserwowalnej). Jednak, jak łatwo zauważyć bliskie sąsiedztwo węzła LSY112 z elektroenergetyczną siecią przesyłową (zewnętrzną, nieobserwowalną), w której znajdują się źródła mocy zwarciowej nie może pozostać bez wpływu na wartość impedancji zwarciowej tego węzła, a przez to również na inne wielkości zwarciowe w tym węźle.

Jako układ identyfikujący zastosowano sieć neuronową jednokierunkową, trójwarstwową na wejściu której podawane są sygnały binarne odpowiadające operacjom łączeniowym na elementach sieci. Warstwę wejściową stanowi 13 neuronów odpowiadających operacjom w sieci wewnętrznej. Warstwa ukryta składa się z 5 neuronów, w których wykorzystano jako funkcję aktywacji tangens hiperboliczny. Warstwę wyjściową stanowi jeden neuron z funkcją aktywacji w postaci zmodyfikowanej funkcji liniowej (*LinearTanhAxon* [7]). Na wyjściu sieci otrzymuje się identyfikowaną wartość impedancji zwarciowej węzła LSY112. Do uczenia sieci wykorzystano metodę propagacji wstecznej ze współczynnikiem momentu. Zbiór uczący wykorzystany do wytrenowania sieci zawierał tylko przypadki, w których wykonywane były operacje w sieci wewnętrznej (110 kV). Dzięki temu sieć neuronowa wytrenowana została do identyfikacji zjawisk w sieci wewnętrznej.

Wyniki uzyskane dla zbioru testowego zaprezentowane zostały na rys. 3.6. Pierwszych 12 próbek opisuje operacje topologiczne wykonywane jedynie w sieci wewnętrznej, dla której układ identyfikujący był trenowany. Pozostałe próbki opisują operacje wykonywane w sieci zewnętrznej oraz operacje wykonywane równocześnie w sieci zewnętrznej i wewnętrznej. Próbkę 20 pozwalają określić wielkość błędów, jakie może popełniać ANN przy podaniu na wejściu informacji niepełnych.



Rys. 3.6. Obliczone i identyfikowane wartości Z_k dla zbioru testowego



Rys. 3.7. Wartości błędów popełnianych przez układ identyfikujący

Na podstawie analizy danych wykorzystanych do uzyskania obu rysunków można sformułować następujące wnioski:

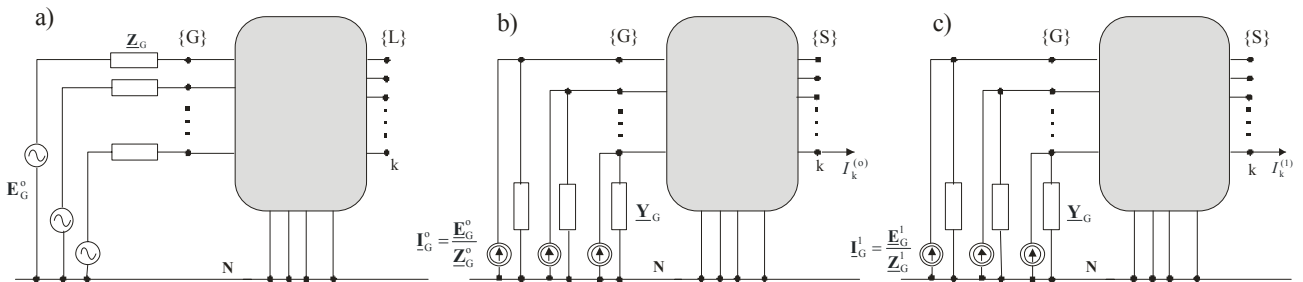
1. Dla próbek opisujących operacje topologiczne wykonywane w sieci wewnętrznej, układ identyfikujący charakteryzuje się bardzo dużą dokładnością, dla 10 próbek błąd względny jest mniejszy od 0,01. Dla pozostałych dwóch próbek błąd względny nie przekroczył 0,02.
2. W przypadku pojawienia się próbek opisujących operacje wykonywane w sieci zewnętrznej, błąd popełniany przez sieć zależy od wpływu tej operacji na wartość impedancji zwarciowej węzła. Dla próbek 13-15 oraz 17 wpływ ten jest praktycznie pomijalny. Próbki 12, 16, 18 i 19 pokazują, że wpływ takich operacji może znacząco zwiększyć wartość popełnianych błędów, operacje te dotyczą elementów łączących rozpatrywaną sieć ze źródłami mocy zwarciowej. W przypadku próbek 20 i 21 błąd względny osiąga wartość 0,3 (30%) co dyskwalifikuje uzyskany wynik. Błąd taki wynika z faktu nieuwzględnienia przez układ identyfikujący odłączenia linii tworzącej połączenie z węzłem KOZ422 (Kozienice 400 kV) będącym głównym źródłem mocy zwarciowej dla węzła LSY.

4 Zastosowanie techniki ANN do wyznaczania parametrów zwarciowych węzła sieci przy wykorzystaniu lokalnych pomiarów wielkości analogowych

4.1 Wyznaczanie impedancji zwarciowej węzła sieci

Na rys. 4.1a przedstawiono model sieci wielowęzłowej. Zbiór $\{L\}$ odwzorowuje rzeczywiste węzły sieci. Zbiór $\{G\}$ opisuje węzły odpowiadające zaciskom źródeł (generatorów synchronicznych) przedstawionych jako siła elektromotoryczna i impedancja. Jeżeli przyjęte zostanie założenie, że w zbiorze $\{L\}$ znajdują również węzły, do których dołączone są odbiory, to sieć taką można opisać zależnością

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_G^o \\ \underline{I}_L^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{GG} & \underline{Y}_{GL} \\ \underline{Y}_{LG} & \underline{Y}_{LL} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{E}_G^o \\ \underline{U}_L^o \end{bmatrix} \quad (4.1)$$



Rys. 4.1. Model sieci wielowęzłowej: a) model z wyróżnionymi sem, b) model dla stanu (O) ze źródłami prądowymi, c) model dla stanu (1) ze źródłami prądowymi.

Na rysunku 4.1b oraz 4.1c siły elektromotoryczne zastąpione zostały przez źródła prądowe. Wyróżniony został również węzeł k , przyjęto, że wszystkie pozostałe węzły należą do zbioru $\{S\}$, który spełnia następującą zależność

$$(\{G\} \cup \{L\}) - \{k\} = \{S\} \quad (4.2)$$

sieć taką opisana została w dwóch stanach pracy (O) i (1) następującymi równaniami

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_S^o \\ -\underline{I}_k^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{SS} & \underline{Y}_{Sk} \\ \underline{Y}_{kS} & \underline{Y}_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_S^o \\ \underline{U}_k^o \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}_S^1 \\ -\underline{I}_k^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{SS} & \underline{\mathbf{Y}}_{Sk} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{kS} & \underline{Y}_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_S^1 \\ \underline{U}_k^1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

na podstawie równań (4.3) i (4.4) wartości poszczególnych prądów zostały wyznaczone jako

$$\begin{cases} \underline{\mathbf{I}}_S^0 = \underline{\mathbf{Y}}_{SS} \underline{\mathbf{U}}_S^0 + \underline{\mathbf{Y}}_{Sk} \underline{U}_k^0 \\ -\underline{I}_k^0 = \underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{U}}_S^0 + \underline{Y}_{kk} \underline{U}_k^0 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} \underline{\mathbf{I}}_S^1 = \underline{\mathbf{Y}}_{SS} \underline{\mathbf{U}}_S^1 + \underline{\mathbf{Y}}_{Sk} \underline{U}_k^1 \\ -\underline{I}_k^1 = \underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{U}}_S^1 + \underline{Y}_{kk} \underline{U}_k^1 \end{cases} \quad (4.6)$$

Z równań tych wyznaczona została różnica prądów w stanie (O) i (1) dla poszczególnych zbiorów węzłów sieci, którą wyrażono jako

$$\begin{cases} (\underline{\mathbf{I}}_S^1 - \underline{\mathbf{I}}_S^0) = \underline{\mathbf{Y}}_{SS} (\underline{\mathbf{U}}_S^1 - \underline{\mathbf{U}}_S^0) + \underline{\mathbf{Y}}_{Sk} (\underline{U}_k^1 - \underline{U}_k^0) \\ (\underline{I}_k^0 - \underline{I}_k^1) = \underline{\mathbf{Y}}_{kS} (\underline{\mathbf{U}}_S^1 - \underline{\mathbf{U}}_S^0) + \underline{Y}_{kk} (\underline{U}_k^1 - \underline{U}_k^0) \end{cases} \quad (4.7)$$

a dalej po przekształceniu uzyskano

$$(\underline{I}_k^0 - \underline{I}_k^1) = \underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{Y}}_{SS}^{-1} (\underline{\mathbf{I}}_S^1 - \underline{\mathbf{I}}_S^0) + (\underline{Y}_{kk} - \underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{Y}}_{SS}^{-1} \underline{\mathbf{Y}}_{Sk}) (\underline{U}_k^1 - \underline{U}_k^0) \quad (4.8)$$

pozwoliło to na wyznaczenie admitancji w postaci

$$(\underline{Y}_{kk} - \underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{Y}}_{SS}^{-1} \underline{\mathbf{Y}}_{Sk}) = \frac{(\underline{I}_k^0 - \underline{I}_k^1) - \underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{Y}}_{SS}^{-1} (\underline{\mathbf{I}}_S^1 - \underline{\mathbf{I}}_S^0)}{(\underline{U}_k^1 - \underline{U}_k^0)} \quad (4.9)$$

na podstawie zależności (4.9) impedancję węzła k wyrażona została jako

$$\underline{Z}_k = (\underline{Y}_{kk} - \underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{Y}}_{SS}^{-1} \underline{\mathbf{Y}}_{Sk})^{-1} = \frac{(\underline{U}_k^1 - \underline{U}_k^0)}{(\underline{I}_k^0 - \underline{I}_k^1) - \underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{Y}}_{SS}^{-1} (\underline{\mathbf{I}}_S^1 - \underline{\mathbf{I}}_S^0)} \quad (4.10)$$

Jeżeli przyjąć, że w obu stanach pracy wartość wektorów prądów źródłowych pozostaje niezmienna, tzn. nie zaszły żadne zmiany wpływające na wielkości charakteryzujące źródło, to $\underline{\mathbf{I}}_S^1 - \underline{\mathbf{I}}_S^0 = 0$, a stąd

$$\underline{\mathbf{Y}}_{kS} \underline{\mathbf{Y}}_{SS}^{-1} (\underline{\mathbf{I}}_S^1 - \underline{\mathbf{I}}_S^0) = 0 \quad (4.11)$$

W takim przypadku impedancję $\underline{Z}_k$ można wyrazić jako

$$\underline{Z}_k = \frac{(\underline{U}_k^1 - \underline{U}_k^0)}{(\underline{I}_k^0 - \underline{I}_k^1)} \quad (4.12)$$

wyrażenie (4.12) będzie opisywać impedancję zastępczą węzła [2]. Taki sytuacja miałaby miejsce, gdyby stan (1) był przypadkiem celowego zwarcia pomiarowego. W rzeczywistości przejście od stanu (O) do stanu (1) jest bliżej nieokreślonym wolnozmiennym procesem nieustalonym, dla którego założenie o niezmiennych wartościach prądów źródłowych $\frac{\underline{E}_G}{\underline{Z}_G}$ nie jest spełnione.

Przyjmując, że impedancja zastępcza jest wartością skorelowaną z impedancją zwarciovą węzła, założono, że możliwe jest zbudowanie układu dokonującego identyfikacji wartości impedancji zwarciovą węzła (początkowy stan zwarcia) na podstawie składowych sygnału napięcia i prądu,

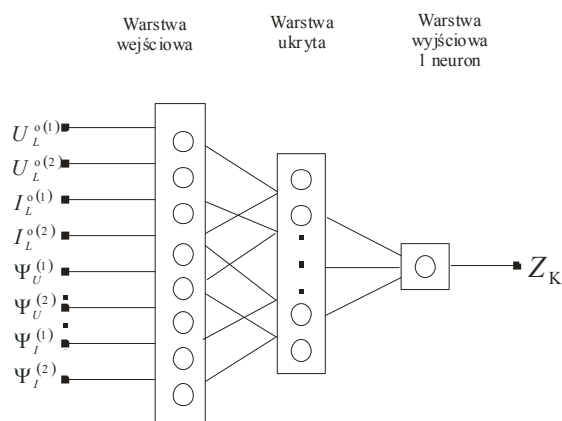
otrzymanych w różnych chwilach czasu. Składowe te mogą być wyrażone jako para moduł i kąt lub część czynna i bierna. Założono, że do rozwiązania tak, zdefiniowanego problemu wykorzystana zostanie „inteligencja” ANN. W ogólnym przypadku przyjęto, że w dwóch dowolnych chwilach czasowych zmianie podlegać będą zarówno moduły prądów i napięć jak i ich kąty. Dlatego na wejściu układu podawanych będzie równocześnie 8 wielkości. Na wyjściu układu prezentowana będzie jego odpowiedź w postaci wartości Z_K wyrażonej w omach.

Zakładając, że można wyznaczyć wartość modułu i kąta dla sygnałów napięcia i prądu [9], [11], poszczególne wielkości w równaniu (4.12), przyjmą dla sygnałów napięciowych następującą postać

$$\begin{aligned} \underline{U}_k^0 &= U_k^0 e^{j\psi_U^0} & \underline{I}_k^0 &= I_k^0 e^{j\psi_I^0} \\ \underline{U}_k^1 &= U_k^1 e^{j\psi_U^1} & \underline{I}_k^1 &= I_k^1 e^{j\psi_I^1} \end{aligned} \quad \text{oraz} \quad (4.13)$$

gdzie U_k^0 - oznacza moduł wektora napięcia w chwili (0), I_k^0 oznacza moduł prądu w chwili (0), ψ_U^0 kąt wektora napięcia w chwili (0) oraz ψ_I^0 kąt wektora prądu w chwili (0). Podobne zależności występują również dla chwili (1).

Zastosowanie zależności (4.12) pozwala wyznaczyć impedancję zastępczą węzła na podstawie obserwacji zmian wartości sygnałów powodowanych niewielkimi zmianami obciążenia. Otrzymana impedancja zastępcza jest wielkością uzyskaną w stanie ustalonym.



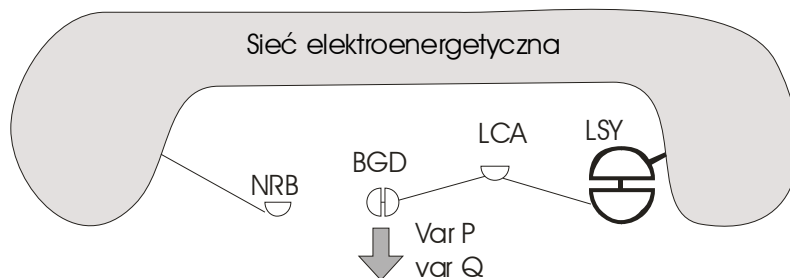
Rys. 4.2. Model układu wykorzystującego ANN do identyfikacji impedancji zwarcia węzła na podstawie sygnałów dostępnych lokalnie

Istota zastosowania ANN polega na tym, że wspomniana korelacja (*impedancja zastępcza* $Z_k \rightarrow$ *impedancja zwarcia* Z_K) nie jest określona w sposób jawny, tylko zostaje ustalona na podstawie „inteligencji” sieci neuronowej, wytrenowanej w odpowiedni sposób za pomocą profesjonalnego oprogramowania zwarcia. Takiego efektu nie udało się osiągnąć stosując obliczenia i pomiary wg zależności (4.12).

4.2 Identyfikowanie wartości impedancji zwarcia na podstawie zmian obciążenia

Przystępując do modelowania zmian topologicznych założono, że układ identyfikujący wartość impedancji zwarcia węzła LSY112 powinien poprawnie odwzorowywać jej zmiany zachodzące w wyniku wykonywania operacji topologicznych w sieci przesyłowej (nieobserwowanej). Ponieważ, jak pokazane zostało w rozdziale 3, nie wszystkie wyłączenia w sieci przesyłowej w sposób istotny wpływają na wielkości zwarcia w węźle LSY112, wybrano tylko te, których pominięcie prowadziło do popełniania błędów przez opisany w tym rozdziale układ identyfikujący.

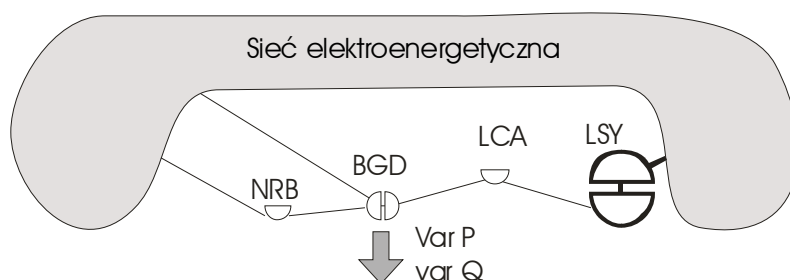
Jak pokazano w rozdziale 4.1, aby skorzystać z zależności (4.12), konieczne jest wymuszenie zmian obciążenia w węźle znajdującym się za punktem, w którym dokonywany jest pomiar prądu i napięcia. Ponieważ sztuczne wymuszenie zmian w topologii sieci 110 kV jest trudne do praktycznej



Rys. 4.3. Rozdzielnia BGD jednostronnie zasilana

1. Rozdzielnia BGD zasilana jest promieniowo jedną linią LSY-LCA-BDG od strony rozdzielni LSY

- (rys. 4.3). Układ uzyskano poprzez wyłączenie dwóch pozostałych linii zasilających rozdzielnię BGD.
2. Rozdzielnia BGD zasilana jest trzema liniami tak, jak w rzeczywistym układzie sieci (rys. 4.4).



Rys. 4.4. Rozdzielnia BGD zasilana trzema liniami

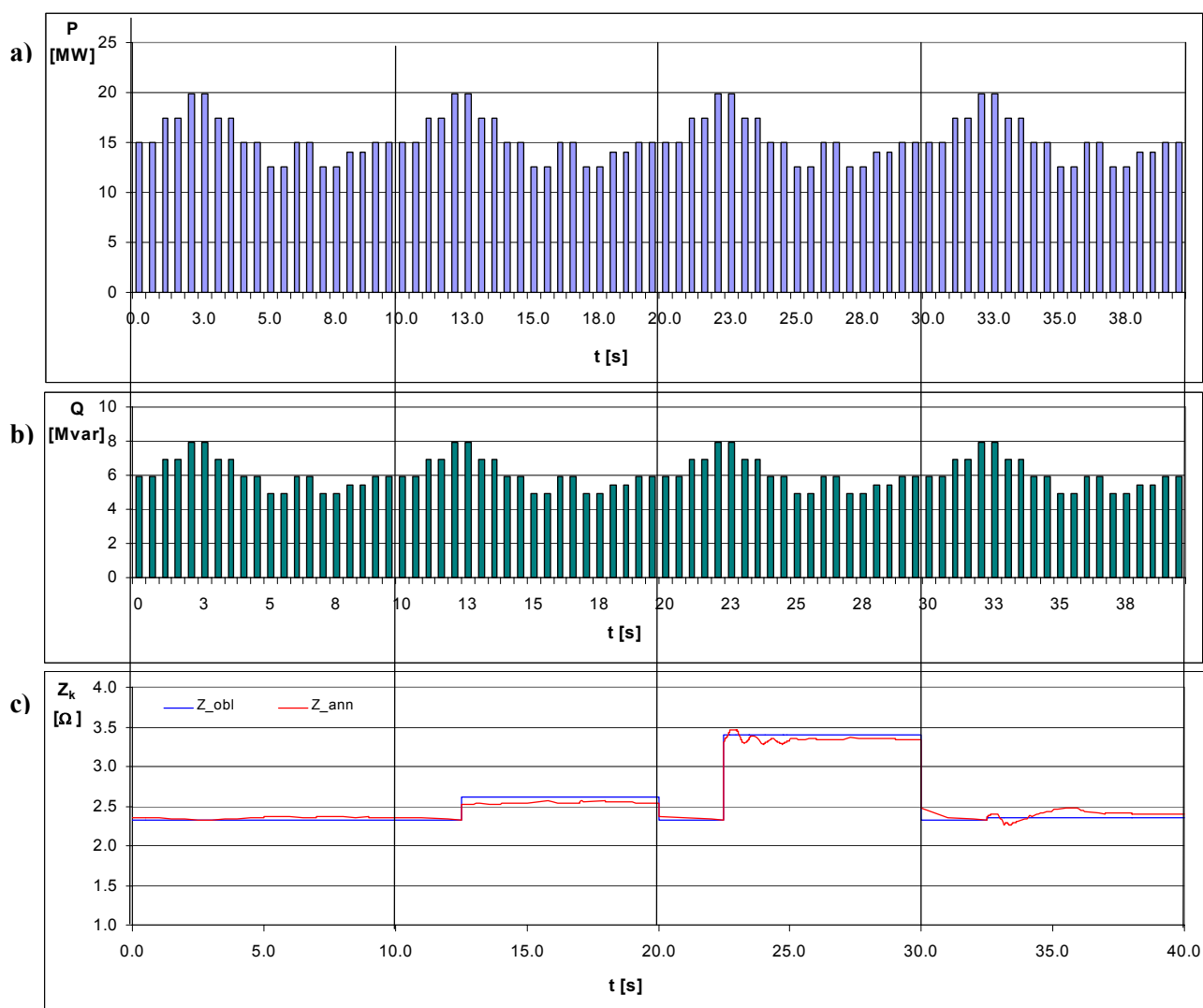
Zmiany mocy w rozdzielni BGD, w obu wariantach, wpływają na moduł i kąt napięcia

mierzonego w węźle LSY112, a także na moduł i kąt prądu płynącego linią LSY-LCA-BDG. Jednak dla obu wariantów wpływ ten jest różny.

1. Wariant podstawowy, zgodny z rzeczywistą topologią sieci.

2. Wyłączenie autotransformatora ATR2 w węźle LSY.
3. Wyłączenie linii 400 kV LSY-KOZ.
4. Wyłączenie generatora TB10 w węźle KOZ412

W efekcie tak zdefiniowanych zmian zachodzących w sieci powstał zbiór uczący obejmujący oba warianty, w którym modelowano różne kombinacje operacji topologicznych przy różnych modyfikacjach obciążenia.



Rys. 4.5. Zmiany mocy obciążenia w węźle BGD dla których wyznaczono wartości Z_k w węźle LSY112: a) zmiany mocy P , b) zmiany mocy Q , c) obliczona (kolor niebieski) i identyfikowana (kolor czerwony) wartości Z_k .

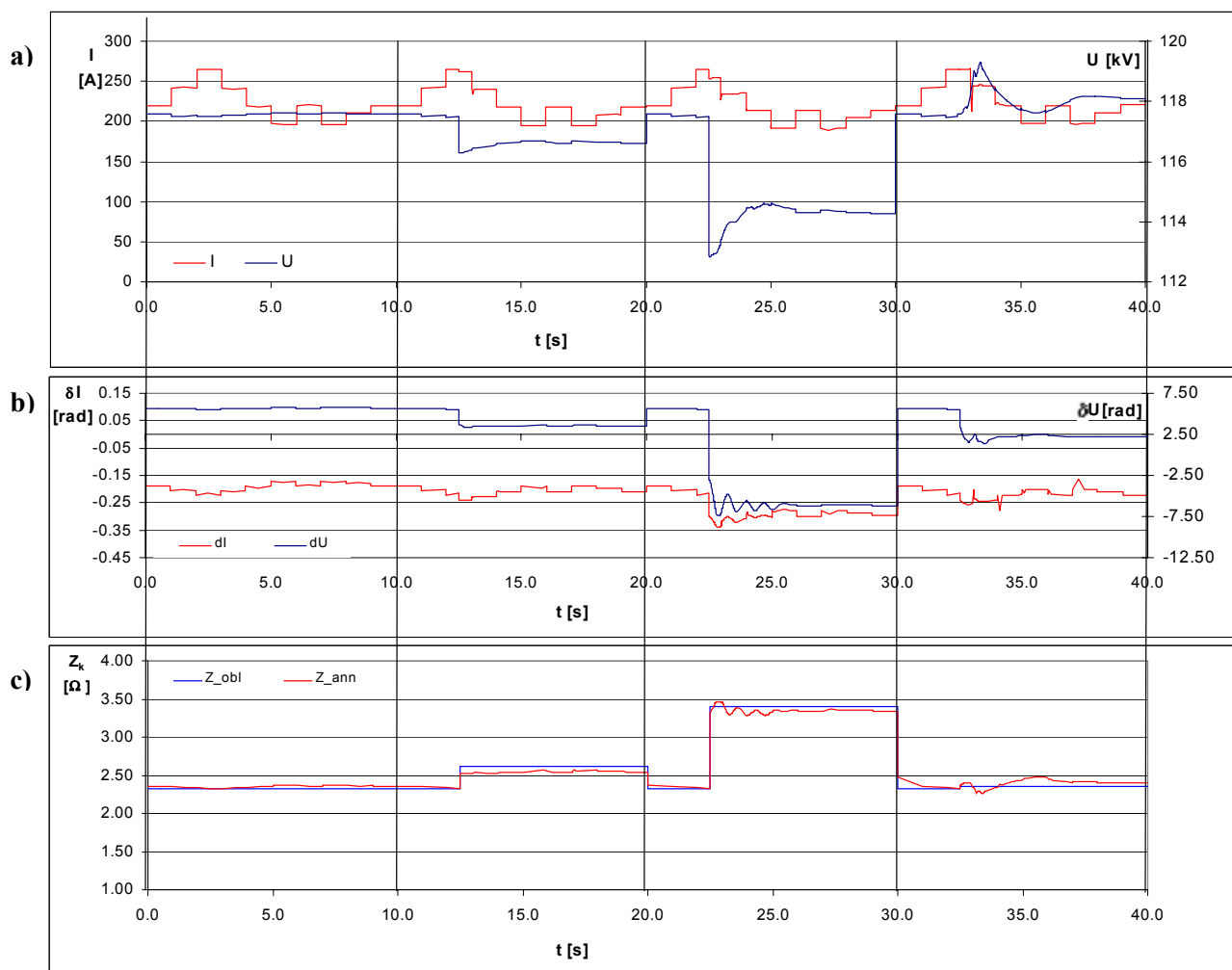
W modelu dokonującym identyfikacji wartości impedancji zwarciowej węzła jako element identyfikujący zastosowano sieć neuronową, jednokierunkową, trójwarstwową, w której na ośmiu neuronach wejściowych prezentowane były wielkości opisane zależnością (4.12). W obu przypadkach otrzymane wyniki były porównywalne. W warstwie ukrytej wykorzystano 13 neuronów, dla których jako funkcję aktywacji zastosowano tangens hiperboliczny. Warstwę wyjściową stanowi jeden neuron z liniową funkcją aktywacji, na wyjściu którego prezentowana jest wartość identyfikowanej impedancji zwarciowej Z_k , która porównywana jest z wartością obliczoną w programie SHORTS, przyjętą za wartość dokładną. Do uczenia sieci wykorzystano algorytm BP ze współczynnikiem momentu.

Sieć ta, mimo tak prostej struktury charakteryzuje się dobrymi właściwościami identyfikacyjnymi. Uzyskane wyniki zaprezentowane zostały dla wariantu przedstawionego na rys. 4.3, dla którego przygotowano zbiory danych testowych.

Na rys. 4.5 przedstawione zostały przebiegi czasowe dla różnych wielkości elektrycznych zmierzonych w rozpatrywanym układzie. Przebiegi czasowe podzielone zostały na cztery dziesięciosekundowe okresy. Kompresja czasu trwania zdarzeń do okresów 10-sekundowych wynikała jedynie ze względów pragmatycznych i z dążenia do uniknięcia błędów w pracy programu Eurostag. W rzeczywistości stany związane z poszczególnymi konfiguracjami sieci mogą trwać wiele godzin.

W pierwszym okresie (0-10 s) wystąpiły jedynie zmiany obciążenia w węźle BGD. W drugim okresie (10-20 s) przy identycznych zmianach obciążenia w chwili $t_1=12,5$ s nastąpiło wyłączenie autotransformatora ATR2. Koniec okresu jest równoznaczny z powrotem do topologii pierwotnej. W trzecim okresie (20-30 s) obciążenie pozostało identyczne jak w pierwszym, ale w czasie $t_2=22,5$ s od początku okresu symulacji nastąpiło wyłączenie linii LSY-KOZ. W czwartym okresie nastąpiło wyłączenie generatora TB10 w chwili $t_3=32,5$ s. W tym okresie również występowały identyczne zmiany obciążenia jak w okresie pierwszym.

Pierwsza część wykresu prezentuje zmiany mocy czynnej w węźle BGD, a druga zmiany mocy biernej. W dolnej części wykresu prezentowane są: wartość obliczona impedancji Z_K (kolor niebieski) oraz jej wartość identyfikowana za pomocą ANN (kolor czerwony). Wykres ten potwierdza,



Rys. 4.6. Przebiegi prądu i napięcia mierzone w polu linii LSY-LCA, dla których wyznaczono wartości Z_K w węźle LSY112: a) zmiany modułu prądu i napięcia, b) zmiany kąta prądu i napięcia, c) obliczona (kolor niebieski) i identyfikowana (kolor czerwony) wartości Z_K .

że zespolone wartości prądu i napięcia mogą być podstawą do wyznaczania impedancji zwarciowej węzła, zmieniającej się wraz ze zmianami topologii sieci. Mechanizm identyfikacji nie jest jednak „czysto metrologiczny” (jak w [2], [3]) ale dzięki wykorzystaniu ANN wykorzystuje on efekt wnioskowania osiągnięty po wytrenowaniu sieci za pomocą odpowiedniego oprogramowania.

Rozszerzeniem danych zaprezentowanych na rys. 4.5 jest rys. 4.6, na którym przedstawiono przebieg napięcia w węźle LSY112 oraz przebieg prądu płynącego w linii LSY-LCA-BGD zasilającej rozdzielnię BGD. Są one o tyle istotne, że pokazują na jednym rysunku zarówno dane wejściowe podawane na wejściu sieci neuronowej zastosowanej do identyfikacji (wykres górny i środkowy), jak i wielkości uzyskiwane na jej wyjściu (wykres dolny).

Ponieważ w badaniach przyjmowano, że rozdzielnia BGD zasilana jest promieniowo, przebieg modułu prądu w linii zasilającej jest zbliżony swym kształtem do przebiegu mocy czynnej odbieranej

z tej rozdzielni. Przebiegi dla pierwszego okresu pokazują, że zmiany mocy odbieranej powodują zmiany modułu prądu przy niemal stałej wartości modułu napięcia. Podobnie zachowują się przebiegi dla kąta prądu i napięcia. W rozpatrywanym przypadku wartość modułu prądu zachowuje identyczny przebieg we wszystkich okresach.

W przypadku wystąpienia zmian topologicznych następuje zmiana wartości modułu napięcia oraz jego kąta. Zmiany kąta wektora prądu są widoczne dopiero w trzecim okresie, w którym następuje wyłączenie linii LSY-KOZ. To na podstawie wartości tych wielkości ANN dokonuje identyfikacji Z_K . Dlatego każda zmiana relacji pomiędzy nimi powoduje wyznaczenie nowej wartości Z_K .

W dolnej części rys. 4.5 wyraźnie widać, że wartość impedancji węzła identyfikowana przez ANN jest zbliżona do wartości obliczonej za pomocą programu SHORTS, czyli takiej którą można przyjąć za rzeczywistą. Większe wartości błędu, jakie pojawiają się w trzecim i czwartym okresie symulacji wynikają z wystąpienia stanów przejściowych, co wyraźnie widać w przebiegu napięcia. Jednak nawet w tych stanach wartość Z_K otrzymana z układu identyfikującego oscyluje wokół wartości oczekiwanej.

Na podstawie analizy tego wariantu można stwierdzić, że układ sieci elektroenergetycznej, w której do węzła przyłączona jest linia zasilana jednostronnie od strony tego węzła, może zostać zastosowany do dostarczenia danych pomiarowych, które mogą być wykorzystane przez ANN do identyfikowania wartości impedancji zwarciowej tego węzła.

5 Propozycja wielokryterialnego układu do identyfikacji parametrów węzła sieci na podstawie pomiarów lokalnych

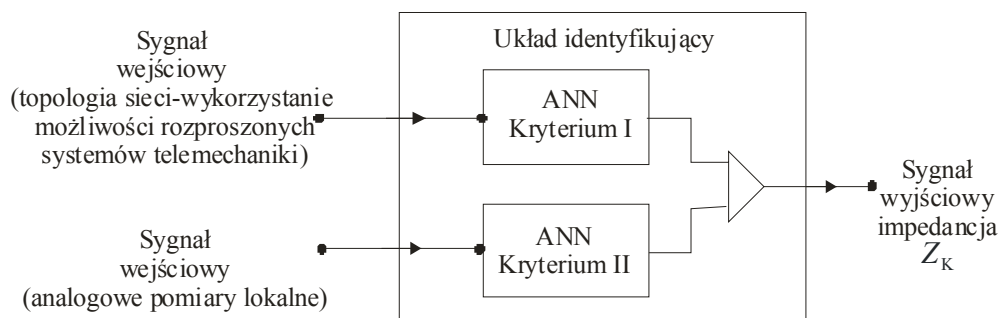
W procesie identyfikowania wartości wielkości zwarciowych w rozdzielni KOP-LAZ na podstawie sygnałów dwustanowych stwierdzono, że największy wpływ na warunki zwarciowe w tej rozdzielni ma stan elementów w jej sąsiedztwie. Obliczenia zademonstrowane w rozdziale 2 pokazały, że wraz z oddalaniem się od rozdzielni (w sensie elektrycznym) wpływ odległych operacji topologicznych na parametry zwarciowe jest coraz mniejszy, aż w końcu staje się znikomy. Podejście wykorzystujące informacje topologiczne uzyskane z fragmentu sieci elektroenergetycznej jest słuszne, pod warunkiem, że pozostała część sieci znajduje się w stanie zbliżonym do normalnego tzn. nie występują w niej poważne awarie oraz wyłączenia. W przeciwnym razie uzyskane wyniki będą niewiarygodne.

Potrzebę stosowania dodatkowego kryterium jeszcze dobitniej pokazuje przykład węzła LSY, w którym identyfikowano wartość impedancji zwarcia tylko na podstawie lokalnych sygnałów dwustanowych z sieci 110 kV (obserwowalnej i opomiarowanej) przy równoczesnej nieobserwowalności sieci przesyłowej.

Zaprezentowany na rys. 2.4 fragment sieci nie jest układem skomplikowanym topologicznie, a mimo to przy pewnych uwarunkowaniach organizacyjno-technicznych identyfikowanie wielkości zwarciowych w oparciu o jedno kryterium może być obciążone znacznym błędem. Ograniczenie działania układu identyfikującego w węźle LSY, wykorzystującego ANN, do sieci 110 kV (obserwowalnej) i nieuwzględnienie wpływu działań topologicznych w sieci przesyłowej (nieobserwowalnej) prowadzi do popełniania znacznych błędów przy identyfikowaniu wartości parametrów zwarciowych.

Do identyfikacji wartości wielkości zwarciowych można wykorzystać również układ identyfikujący wykorzystujący zależność (4.11). W przeciwieństwie do wcześniej stosowanych metod stochastycznych [3] układ wykorzystujący ANN nie posiada stałej czasowej wpływającej na czas uzyskania wyniku, ponieważ wartość wyjściowa identyfikowana jest na podstawie pomiarów osiągniętych w dwóch kolejnych chwilach czasowych. Jest to zarówno zaleta tego układu jak i jego wada. Zaletą jest to, że układ taki dobrze spełnia swoje zadania nawet przy bardzo małych przedziałach czasowych, odpowiadających okresowi próbkowania w urządzeniach pomiarowych, ale dzięki temu w stanach nieustalonych, gdy następuje odkształcenie przebiegu napięcia, może on popełniać większe błędy.

Dlatego też celowe wydaje się zastosowanie rozwiązania, pozwalającego wykorzystać pozytywne cechy obu opisanych metod identyfikacji wartości wielkości zwarciowych.



Rys. 5.1. Model układu identyfikującego wykorzystujące dwie metody wyznaczania impedancji zwarciowej węzła.

Na rys. 5.1 przedstawiono proponowany układ wykorzystujący do określenia impedancji zwarciowej węzła dwa kryteria:

1. Kryterium I - oparte jest na obserwacji topologii sieci elektroenergetycznej (lokalne sygnały dwustanowe).
2. Kryterium II - wykorzystuje do identyfikowania sygnały analogowe (kąt i moduł napięcia, kąt i moduł prądu) mierzone lokalnie.

Zaletą stosowania obu kryteriów jest ich porównywalna szybkość działania oraz wykorzystanie różnych informacji wejściowych w celu osiągnięcia wyniku.

Pierwsze kryterium opisane w rozdziale 3 charakteryzuje się dużą dokładnością uzyskanych identyfikacji, przy założeniu, że dostarczone dane w sposób pełny opisują topologię zadeklarowanego obszaru sieci elektroenergetycznej. Ogromną zaletą tego kryterium jest wykorzystanie danych dwustanowych, które cechuje duża odporność na błędy i niewrażliwość na występowanie stanów nieustalonych. Jednak, jak pokazano w punkcie 3.2, kryterium to posiada również wady. Błędne zdefiniowanie obszaru, w którym znajdują się monitorowane elementy sieci elektroenergetycznej lub brak informacji o zmianach stanu szczególnie ważnych elementów prowadzi do popełniania poważnych błędów.

Drugie kryterium wykorzystuje wartości prądów i napięć mierzonych w obrębie nadzorowanego węzła, dzięki czemu jest niezależne od informacji zewnętrznych. Może więc być stosowane w każdym węźle, bez konieczności dostarczania danych dodatkowych. Wykorzystanie wielkości lokalnych pozwala na ciągłe monitorowanie zmian impedancji zwarciowej danego węzła. Metoda ta, gdy mamy do czynienia z niewielkimi zmianami impedancji Z_K , charakteryzuje się większymi błędami identyfikacji w porównaniu do kryterium I. Dodatkowo metoda ta jest wrażliwa na występujące w sieci stany nieustalone, które mogą być obserwowane w przebiegach prądu i napięcia.

6 Podsumowanie

6.1 Wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz i obliczeń

Prezentowana rozprawa doktorska zawiera propozycje metod pozwalających dokonywać dynamicznej identyfikacji parametrów zwarciowych w wybranym węźle sieci elektroenergetycznej. Ideą dominującą rozprawy była chęć wybrania takich metod, które charakteryzują się prostotą rozwiązania i nie wymagają ingerencji człowieka do procesu uzyskania wyniku, przez co wynik uzyskiwany byłby w sposób automatyczny. W poszczególnych rozdziałach pracy formułowane były uwagi i wnioski związane z przeprowadzonymi badaniami. Poniżej zaprezentowano najważniejsze z nich:

1. Zastosowanie metod macierzowych w obliczeniach zwarciowych pozwala na modelowanie złożonych układów sieci elektroenergetycznej oraz odwzorowanie zmian topologicznych zachodzących w sieci. Choć nie gwarantują one dynamicznego uzyskania wyniku, rezultaty uzyskane przy ich zastosowaniu mogą być traktowane jako dane dla układów dynamicznie identyfikujących wielkości zwarciowe;
2. W rozdziale 2 pokazano jak operacje topologiczne wykonywane w wybranym obszarze krajowej sieci elektroenergetycznej mogą wpływać na warunki zwarciowe w poszczególnych węzłach.

Zaprezentowane zostały dwa układy rozdzielni KOP-LAZ oraz LSY - opisują one przykłady rozdzielni pracujących w różnych warunkach sieciowych. Pierwsza z nich zagrożona jest przekraczaniem dopuszczalnych dla aparatury wartości wielkości zwarciovych, druga jest rozdzielnią, w której na warunki zwarciovych wpływają bardzo znacząco operacje topologiczne wykonywane w nieobserwowalnym fragmencie sieci.

3. Wpływ operacji topologicznych na wartość parametrów zwarciovych maleje wraz ze wzrostem odległości elektrycznej od wybranego węzła. Na podstawie analiz przeprowadzonych w rozdziale 2 można stwierdzić, że największy wpływ na wartości wielkości zwarciovych w węźle sieci elektroenergetycznej mają operacje topologiczne wykonywane bezpośrednio na źródłach mocy zwarciovych lub połączeniach, którymi dopływa moc zwarciova.
4. Dynamiczne identyfikowanie wartości wielkości zwarciovych na podstawie informacji dwustanowych (topologicznych) daje bardzo dobre rezultaty przy prawidłowym zdefiniowaniu obszaru sieci elektroenergetycznej, w którym operacje topologiczne wpływają w sposób istotny na wartość wielkości zwarciovych. Metoda ta wymaga dostarczenia do badanego węzła (przez urządzenia telemechaniki rozproszonej) informacji topologicznych opisujących wyznaczony wcześniej obszar sieciowy.
5. Jak pokazały przypadki zaprezentowane w rozdziale 3 identyfikacja na podstawie sygnałów dwustanowych dostarczanych z obszaru sieciowego pozwala na identyfikowanie wartości dowolnie wybranej wielkości zwarciovej, dla której układ identyfikujący, wykorzystujący sztuczne sieci neuronowe, został zamodelowany i wytrenowany. Identyfikacja ta może odbywać się lokalnie, jak również centralnie w punkcie dyspozytorskim.
6. Przykład rozdzielni KOP pokazał, że identyfikacja na podstawie sygnałów dwustanowych może okazać się niedokładna, jeżeli operacje topologiczne wykonywane są na źródłach mocy zwarciovej (blokach energetycznych) i powodują znaczne zmiany identyfikowanych wielkości. Problemy mogą również pojawić się gdy dane wejściowe podawane do sieci neuronowej nie w pełni opisują zmiany topologiczne, co pokazał przypadek rozdzielni LSY (jeśli istnieje w pobliżu obszar nieobserwowalny).
7. Opisana przez profesora M. Cegielskiego [2] metoda pomiarowego wyznaczania impedancji zastępczej wybranego węzła sieci elektroenergetycznej na podstawie sygnałów prądu i napięcia została zmodyfikowana dla potrzeb identyfikacji impedancji zwarciovej węzła. Zastosowanie sieci neuronowej jako układu identyfikującego pozwoliło pominąć stosowane wcześniej metody stochastyczne i skomplikowane algorytmy matematyczne. Głównym atutem tej metody jest brak uzależnienia identyfikacji od informacji z obszarów nieobserwowalnych.
8. Układ oparty na sztucznej sieci neuronowej pozwala na poprawną identyfikację impedancji zwarciovej na podstawie sygnałów mierzonych lokalnie niezależnie od kierunku przepływu prądu w linii, na której dokonywany jest jego pomiar oraz od sposobu przyłączenia tej linii w sieci elektroenergetycznej. Dobre rezultaty uzyskiwane są nawet przy niewielkich zmianach obciążenia.
9. Zaproponowany układ dwukryterialny pozwala na wykorzystanie zalet obu metod identyfikujących impedancję zwarciową węzła. Pozwala również na elastyczne dostosowanie działania do warunków pracy węzła w sieci elektroenergetycznej. Jego cechą charakterystyczną jest podejmowanie decyzji na podstawie różnych kryteriów i niezależnych zbiorów danych.
10. Opracowane metody identyfikacji, choć korzystają pośrednio z metod macierzowych na etapie uczenia sieci neuronowych i wymagają dużych nakładów pracy przy opracowywaniu danych uczących niezbędnych przy ich trenowaniu, pozwalają na dynamiczne i w pełni automatyczne uzyskanie wyniku.
11. Przedstawione układy identyfikujące charakteryzują się tym, że wynik uzyskiwany jest w czasie rzeczywistym. Mogą być również wykorzystane w pracach projektowych oraz analizach przeprowadzanych po wystąpieniu określonych zdarzeń.
12. Zaprezentowane w rozdziale 3 i 4 układy pomiarowe (identyfikujące) pozwalają na stwierdzenie, że postawiona we wstępie teza została udowodniona, wykazano bowiem, że możliwa jest identyfikacja wartości wielkości zwarciovych w systemie elektroenergetycznym na podstawie analizy lokalnie dostępnych sygnałów.

6.2 Oryginalne osiągnięcia rozprawy

Celem rozprawy było opracowanie metod pozwalających na dynamiczną identyfikację wartości wybranych wielkości zwarciovych. W trakcie realizacji pracy opracowano rozwiązania niestosowane dotychczas w obliczeniach zwarciovych. Do głównych osiągnięć rozprawy zdaniem autora należą:

- opracowanie oryginalnej metody identyfikacji wartości wielkości zwarciovych na podstawie informacji dwustanowych opisujących topologię sieci elektroenergetycznej; do tego celu wykorzystano jako układy identyfikujące sieć neuronową jednokierunkową; jak pokazały przykłady zaprezentowane w rozdziale 3, możliwa jest identyfikacja dla skomplikowanych topologicznie przypadków sieci elektroenergetycznej;
- zdefiniowanie, jakie elementy sieci elektroenergetycznej muszą zostać opisane sygnałami binarnymi aby układ identyfikujący na podstawie takich sygnałów otrzymywał na wejściu tylko niezbędne informacje, a zarazem by informacje te były wystarczające do jego prawidłowego działania;
- zaproponowanie zastosowania sztucznej sieci neuronowej do identyfikowania impedancji zwarciowej na podstawie sygnałów pomiarowych dostępnych lokalnie w wybranym węźle sieci elektroenergetycznej; w tym celu wykorzystano również prostą sieć neuronową jednokierunkową; zaletą tego układu jest możliwość uzyskania wielkości, która jest względnie łatwa do wyznaczenia obliczeniowo ale trudna do wyznaczenia pomiarowo;
- przedstawienie układ dwukryterialnego, którego podstawową zaletą jest wykorzystanie przy identyfikacji impedancji zwarciowej węzła dwóch niezależnych od siebie kryteriów i zbiorów danych wejściowych – sygnałów pomiarowych (analogowych) i lokalnych sygnałów dwustanowych określających topologię w otoczeniu węzła sieci.

7 Literatura (wybrane pozycje wykorzystane w autoreferacie)

- [1] CZAPP S.: *Wyznaczanie impedancji pętli zwarciowej metodą wektorową w sieci z obciążeniami roboczymi*. Materiały konferencyjne APE'03. Jurata 2003 s. 237-242.
- [2] CEGIELSKI M.: *Wyznaczanie impedancji zastępczej systemu elektroenergetycznego w warunkach ruchowych*. Prace Instytutu Systemów Energetycznych zeszyt 14. Wrocław 1969.
- [3] CEGIELSKI M., SOBIERAJSKI M., WILKOSZ K.: *Stochastyczna metoda wyznaczania impedancji zastępczej węzła odbiorczego sieci elektroenergetycznej*. Materiały konferencyjne APE'01. Jurata 2001 s. 71-78.
- [4] DUCH W., KORBICZ J., RUTKOWSKI L., TADEUSIEWICZ R.: *Sieci neuronowe*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit 2000.
- [5] KREMENS Z., SOBIERAJSKI M.: *Analiza systemów elektroenergetycznych*. Warszawa, WNT 1996.
- [6] KACEJKO P., MACHOWSKI J.: *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*. Warszawa, WNT 2002.
- [7] NeuroSolution. User Manual, Version 4.
- [8] OSOWSKI S.: „Sieci neuronowe”, Warszawa, OWPW 1994.
- [9] ROSOŁOWSKI E.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w automatyce elektroenergetycznej*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT 2002.
- [10] RUTKOWSKA D. PILIŃSKI M. RUTKOWSKI L.: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. Warszawa, PWN 1997.
- [11] SZAFRAN J., WISZNIEWSKI A.: *Algorytmy cyfrowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej*. Warszawa, WNT 2001.