

# Rozwiązania wspomagające bezpieczeństwo i niezawodność urządzeń elektroenergetycznych SN

Zarządzanie infrastrukturą elektroenergetyczną coraz częściej jest wspomagane przez inteligentne systemy decyzyjne, przy udziale zaawansowanych systemów pomiarowych, zabezpieczeniowych i akwizycji danych. Elektrometal Energetyka S.A. wprowadza szereg nowych funkcjonalności sterowników polowych e<sup>2</sup>TANGO, które nie tylko pomagają użytkownikom w zabezpieczeniu, kontroli i sterowaniu obiektami elektroenergetycznymi, ale też – dzięki wyposażeniu w autorskie algorytmy decyzyjne – pozwalają na predykcję rozwijających się uszkodzeń oraz eliminację zakłóceń.

Nienormalne stany pracy systemów elektroenergetycznych, w tym zwarcia i ich wykrywanie, mają duży wpływ na niezawodność systemu elektroenergetycznego i pewność dostaw energii elektrycznej. Przedłużający się czas trwania zwarcia może powodować straty finansowe spowodowane nie tylko uszkodzeniami urządzeń biorących udział w zwarciu, ale również dłuższymi przestojami procesów po stronie odbiorców.

Szczególnie niebezpieczne i drastyczne w skutkach są zwarcia łukowe, w tym wewnętrzne zwarcia łukowe w rozdzielnicy. Są one bardzo rzadkie, ale możliwe. Zwarcia łukowe wewnątrz rozdzielnicy średniego napięcia należą do najbardziej katastrofalnych zdarzeń, jakie mogą mieć miejsce w trakcie eksploatacji. Zdarzają się bardzo rzadko, prawdopodobieństwo ich wystąpienia jest bardzo małe, niemniej jednak ich skutki mogą być drastyczne, dlatego nie można ich wykluczyć. Wytrzymałość rozdzielnicy na zwarcie łukowe nie jest wymaganiem obowiązkowym z punktu widzenia normy przedmiotowej, np. 62271-200, ale powinna być pożądana – w celu ograniczenia możliwych strat materialnych oraz zagrożenia dla zdrowia i życia ludz-

## STRESZCZENIE

W artykule omówiono wybrane wdrożone rozwiązania produkcji Elektrometal Energetyka S.A., wspomagające bezpieczeństwo i niezawodność urządzeń elektroenergetycznych SN, takie jak: zabezpieczenia łukoochronne i od ferorezonansu oraz algorytmy predykcyjne do wykrywania uszkodzeń silników.

**Słowa kluczowe:** łukoochronność, ferorezonans, predykcja, zabezpieczenie falowe.



Rys. 1. Rozdzielnica e<sup>2</sup>ALPHA 12 kV, 40 kA podczas prób łukowych oraz przykład nieudanej próby łukowej  
rys. W. Chmielak

kiego. Niezależnie od zapewnienia łukoochronności, zgodnie z wymaganiami odpowiedniej normy, możliwe są dodatkowe metody i środki ograniczające skutki takiego zdarzenia awaryjnego.

Czasy działania aktualnie stosowanych konwencjonalnych zabezpieczeń linii SN, opartych na pomiarach prądów i napięć o częstotliwości 50 Hz, wynoszą przynajmniej 20 ms. Eliminacja zwarcia wydłuża się dodatkowo o czas własny działania wyłącznika oraz czas łukowy, co sprawia, że wynosi przynajmniej od ok. 60 do 100 ms od chwili powstania zakłócenia. Jest to czas na tyle długi, że pozwala na wyzwolenie dużej energii, która może doprowadzić do istotnych uszkodzeń. Elektrometal Energetyka S.A. przeprowadził szereg prac badawczo rozwojowych, w tym między innymi te, których celem było skrócenie całkowitego czasu trwania zwarcia poniżej 10 ms. Cel ten został osiągnięty dzięki opracowaniu koncepcji nowej rodziny zabezpieczeń WN i SN, wyposażonych w funkcjonalność szybkiej detekcji awarii oraz prototypów wyłączników szybkich, pozwalających na wyłącza-

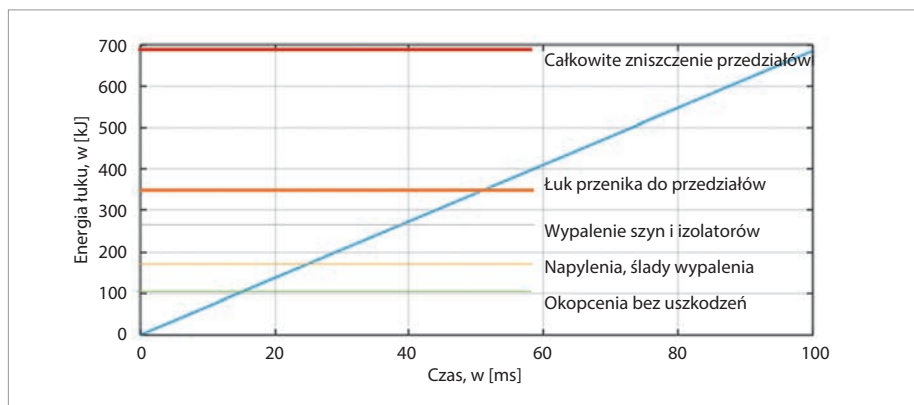
nie prądów zakłóceń w pierwszych milisekundach od ich wystąpienia.

## Łukoodporność rozdzielnic SN

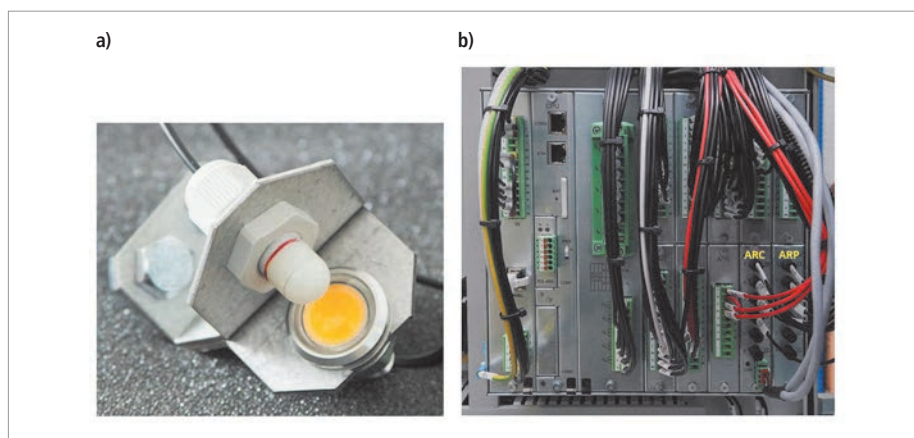
Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia, w tym również rozdzielnice średniego napięcia, powinny charakteryzować się wysoką niezawodnością działania w długim czasie, sięgającym dziesiątków lat. Osiągane jest to poprzez staranne dopracowanie i wykonanie konstrukcji oraz rzetelnie prowadzone badania typu, wyrobu i odbiorcze. Dzięki temu urządzenia elektroenergetyczne pozwalają na długotrwałą pracę w warunkach normalnych oraz krótkotrwałe w warunkach zakłóceń, eliminując i ograniczając skutki pojawiających się problemów. Niestety, wskutek wad ukrytych, montażowych i eksploatacyjnych, procesów starzeniowych, błędnych lub wadliwych połączeń czy wyjątkowych warunków pracy – takich jak przepięcia atmosferyczne i łączeniowe, trudne warunki środowiskowe, zabrudzenia, kondensacja, przeciążenia cieplne i elektrodynamiczne, lokalna jonizacja gazu wskutek isk-

zenia oraz zwierzęta, głównie gryzonie – może dojść do zainicjowania zwarcia wewnętrznego nazywanego łukiem awaryjnym. Skutki takiego zwarcia dotyczą nie tylko samego układu zasilania wskutek uszkodzenia pojedynczego pola lub rozdzielnic, ale też mogą pociągać za sobą ogromne straty ekonomiczne i społeczne – w związku z awaryjnym długotrwałym odstawieniem układu zasilania i możliwym rozrwanieniem osłony rozdzielnic, prowadzącym do niekontrolowanej emisji do otoczenia płomieni, bardzo gorących i szkodliwych dla zdrowia gazów, strumieni plazmy kropli roztopionego metalu, odłamków konstrukcji oraz promieniowania samego łuku. Łukoochronność może być jednym z podstawowych parametrów znamionowych rozdzielnic wysokiego napięcia. Gdy jest do niej przypisana, to badania wytrzymałości na łuk wewnątrz rozdzielnic są obowiązkowe i powinny być wykonane dla każdego przedziału wysokonapięciowego, zgodnie z klasyfikacją IAC (*Internal Arc Classified*). Klasyfikacja IAC definiuje poziom bezpieczeństwa osób znajdujących się w pobliżu rozdzielnic w przypadku wystąpienia wewnętrznego zwarcia łukowego podczas normalnej pracy rozdzielnic. Znamionowy prąd zwarcia łukowego określany jest przeważnie dla zwarcia trójfazowego, ale może też być wskazany dla zwarcia jednofazowego w przypadku rozdzielnic/przedziałów z izolowanymi torami prądowymi. Dla określonej wartości skutecznej prądu i czasu trwania zwarcia łukowego literami A, B, C opisuje się rodzaj dostępu, a literami F, L, R – stronę, z której możliwy jest bezpieczny dostęp do osłony rozdzielnic. Zgodnie z tą klasyfikacją, możliwy jest dostęp: ograniczony tylko do personelu upoważnionego (A), nieograniczony, w tym również dla osób postronnych (B), ograniczony przez zainstalowanie poza zasięgiem – wykonanie słupowe (C), od przodu rozdzielnic (F), z boku (L) i od tyłu (R). Przypisanie określonej klasy dostępu determinuje warunki, w jakich próba łukoochronności ma być wykonana.

Badania łukoochronności powinny być przeprowadzone co najmniej w każdym skrajnym przedziale reprezentatywnego pola zawierającym część obwodu głównego. Rozdzielnica do badań powinna być w pełni wyposażona, przy czym dopuszcza się stosowanie atrap poszczególnych komponentów, pod warunkiem zachowania tej samej ich objętości i materiałów zewnętrznych jak w zastępowanym komponencie, oraz braku wpływu na obwody główne i uziemienia. Ze względów środowiskowych dopuszcza się zastąpienie gazu izolacyjnego SF<sub>6</sub>



Rys. 2. Ilustracja przyrostu energii w przedziale łukowym z zaznaczonymi poziomami energii występowania poszczególnych uszkodzeń rozdzielnic rys. W. Chmielak

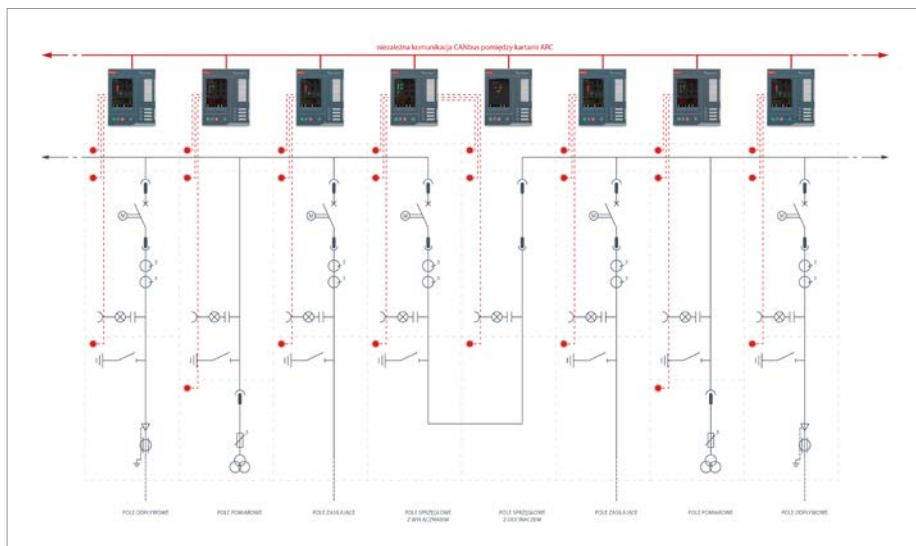


Rys. 3. Czujnik błysku z diodą do jego testowania (a) oraz jednostka centralna sterownika e²TANGO z kartami zabezpieczenia łukoochronnego ARC i ARP (b) rys. W. Chmielak

powietrzem, z zachowaniem ciśnienia znamionowego. W przypadku przedziałów chronionych bezpiecznikami ograniczającymi, badania powinny być wykonane przy największej wartości prądu ograniczonego oraz przy maksymalnym napięciu znamionowym urządzenia. W pozostałych przypadkach napięcie próby może być obniżone, ale musi być wyższe od spodziewanego możliwego napięcia łuku, aby nie doszło do przedwczesnego zgaśnięcia łuku w żadnej z faz, oraz by nie doszło do nadmiernego ograniczania wartości prądu. Jeśli stosowane są inne środki mające na celu ograniczenie skutków łuku, to nie powinny one działać w trakcie badań łukoochronności, o ile nie są przewidziane dodatkowe takie badania. Wartość prądu zwarcia łukowego powinna być stała, a prąd powinien być utrzymany przez czas znamionowy trwania zwarcia obwodu głównego. W przypadku ograniczonych możliwości probierczych laboratorium dopuszcza się wydłużenie czasu łukowego tak, aby cała składowej okresowej prądu była równa wartości wymaganego prądu zwarcia, z tolerancją +10%, -0%. Wartość prądu zwarcia łukowego przeważnie jest równa znamionowemu prądowi wytrzymałemu,

ale może też być mniejsza, jeśli tak określi producent. Czas trwania zwarcia łukowego zazwyczaj wynosi 1 sekundę, ale może też być ustalony na poziomie 0,1 s, 0,5 s lub inny, zgodnie z deklaracją producenta. Zwarcie łukowe wewnątrz rozdzielnic inicjowane jest drutem metalowym o średnicy około 0,5 mm: pomiędzy wszystkimi fazami – dla zwarcia trójfazowego, między fazą a ziemią – w przypadku rozdzielonych przewodów fazowych lub między dwiema fazami w polach, w których tory prądowe są pokryte izolacją stałą. Inicjacja zwarcia powinna mieć miejsce w najdalej oddalonym od zasilania dostępnym punkcie w danym przedziale.

Podczas prób łukowych rozdzielnic do zastosowań wewnętrznych musi być ustawiona w specjalnie przygotowanej przestrzeni, odwzorowującej podłogę, ścianę boczną, tylną i sufit. Jeżeli producent rozdzielnic nie podaje innych odległości, to sufit powinien być na wysokości nie mniejszej niż 2 m od podłogi oraz dla rozdzielnic o wysokości przynajmniej 1,8 m – w odległości 20 cm ± 5 cm od górnej części badanej rozdzielnic. Ściany boczne i tylna, jeśli nie są dostępne, zgodnie z klasyfikacją IAC powinny się znajdować 10 cm ± 3 cm od rozdzielnic. W przypad-



Rys. 4. Schemat ideowy zabezpieczenia łukowego z podstawowymi (czerwone) i dodatkowymi (fioletowe) czujnikami rys. W. Chmielak



Rys. 5. Widok rozdzielni e²ALPHA po próbach łukowych 31,5 kA, 1 s oraz widok przedziału przyłączeniowego rozdzielni e²ALPHA po zwarcie łukowym i zadziałaniu zabezpieczenia łukoochronnego ARC rys. W. Chmielak

ku, gdy ściana tylna rozdzielni jest dostępowa, to odległość od tyłu rozdzielni do ściany pomieszczenia powinna wynosić 80 cm. Jeżeli próby są przeprowadzane przy większych odstępach, to powinny one być zadeklarowane przez producenta jako minimalne dopuszczalne. Jeśli producent rozdzielni określa minimalną liczbę pól rozdzielni dla zapewnienia skutecznej dekompresji ciśnienia lub konstrukcja wymaga stosowania kanałów wydmuchowych do usuwania gazów powstających przy zwarcie łukowym, to zarówno instalacja rozdzielni, jak i próby wewnętrznego zwarcia łukowego powinny być realizowane z odwzorowaniem tych warunków. W przypadku stosowania kanałów wydmuchowych ich wylot powinien się znajdować przynajmniej 2 m od badanej rozdzielni. Producent powinien też wskazać minimalny przekrój poprzeczny kanału wydmuchowego, umiejscowie-

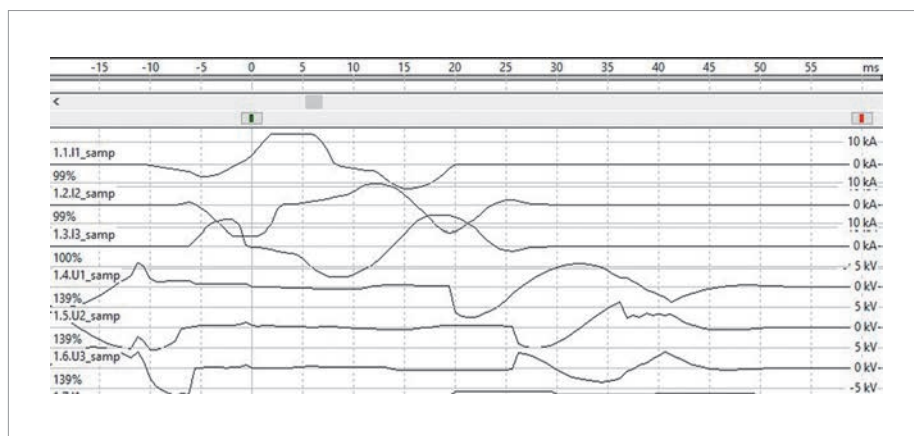
nie oraz właściwości wylotowe, takie jak kłapy, siatki i ich charakterystyki. Ocena cieplnych skutków oddziaływania wewnętrznego zwarcia łukowego na ludzi, którzy mogą znajdować się w pobliżu rozdzielni, realizowana jest przy użyciu wskaźników rozmieszczonych wokół badanej rozdzielni. Dla rozdzielni sklasyfikowanej jako dostępna tylko dla uprawnionego personelu, w założeniu wyposażonego w odpowiednie ubranie i środki ochrony osobistej, wskaźniki są wykonane z grubszego i mniej palnego materiału – czarnego kretonu (bawełniana tkanina, ~150 g/m<sup>2</sup>) oraz ustawione dalej od rozdzielni. W przypadku dostępu do rozdzielni osób postronnych, badania łukoochronności wykonywane są w ostrzejszym reżimie, tj. wskaźniki ustawione są bliżej i wykonane są z cieńszego, bardziej palnego materiału – czarnego batystu bawełniano-linianego (~40 g/m<sup>2</sup>).

Możliwe jest zastosowanie dodatkowych środków ograniczających skutki łuku awaryjnego oraz zapewniających zwiększenie poziomu ochrony osób i urządzeń rozdzielczych w przypadku wystąpienia łuku wewnętrznego. Przyspieszenie reakcji zabezpieczeń na działanie łuku może istotnie ograniczyć jego skutki, co pokazano na **rysunku 2**. Przykładem takich rozwiązań są między innymi: czujniki błysku, ciśnienia, temperatury oraz zabezpieczenie różnicowe szyn zbiorczych powodujące szybkie wyłączenie, bezpieczniki ograniczające wartość prądu i czas trwania zwarcia, uziemniki szybkie zmieniające zwarcie łukowe na metaliczne, sterowanie członem wysuwnym przy zamkniętych drzwiach rozdzielni, układy dekompresyjne oraz inne. Stosowanie tych środków nie zwalnia jednak z potrzeby zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości na zwarcie łukowe, zgodnie z klasyfikacją IAC. Wynika to z faktu możliwego niezadziałania tych środków oraz podtrzymywania wyładowania łukowego przez energię pochodzącą z rozrędzonych maszyn wirujących w obwodzie obciążenia, pomimo odcięcia źródła zasilania.

Stosowanie czujników błysku wraz z szybkim wyłączeniem zasilania wydaje się najbardziej powszechnym rozwiązaniem dla szybkiej reakcji na zwarcie łukowe i dla ograniczenia jego skutków. Niesie jednak ze sobą ryzyko nieuzasadnionego i niekontrolowanego zadziałania wskutek przypadkowego pobudzenia światłem nie pochodzącym od wyładowania łukowego. Dlatego często wprowadza się dodatkowo drugie kryterium potwierdzające wystąpienie zwarcia, takie jak np. kontrola napięcia, stromości prądu lub inne. Rozdzielnice średniego napięcia mogą być wyposażone w czujniki błysku również z układem automatycznego testu czujników. Sterowniki polowe e²TANGO produkcji Elektrometal Energetyka S.A. posiadają takie zabezpieczenie i muszą być wtedy wyposażone w dodatkową kartę zabezpieczenia łukoochronnego ARC. Zabezpieczenie łukoochronne reaguje na błysk światła spowodowany pojawieniem się łuku elektrycznego w przedziałach pola. Sygnał świetlny rejestrowany jest przez umieszczone w przedziałach pola czujniki błysku i za pomocą światłowodów trafia do karty ARC sterownika e²TANGO. Odebrany przez zabezpieczenie sygnał świetlny informuje o zapaleniu się łuku w danym przedziale rozdzielni. Zależnie od przedziału i rodzaju pola, zabezpieczenie wysyła sygnały otwarcia wyłączników do wybranych pól. W celu wyeliminowania zbędnych wyłączeń działanie czujników uzależnione jest od

obniżenia napięcia na szynach sekcji. Informacja o obniżeniu napięcia i sygnały otwarcia wyłączników przesyłane są po magistrali CANBUS. Zabezpieczenie łukoochronne może być zastosowane w rozdzielniach jednosystemowych do czterech sekcji (również z sekcjami połączonymi w pierścieni) lub dwusystemowych z systemem A ciągłym i systemem B ciągłym lub podzielnym na 2 sekcje. Karta ARC zapewnia współpracę z 6 czujnikami i wyposażona jest w port CANBUS. W przypadku konieczności obsługi większej liczby czujników możliwe jest zastosowanie dodatkowej karty ARP z 6 czujnikami, ale bez portu CANBUS. Czujnik błysku oraz karty zabezpieczenia łukoochronnego wbudowane w jednostkę centralną zabezpieczenia e<sup>2</sup>TANGO zostały pokazane na **rysunku 3**. Przykładowy schemat aplikacyjny stosowania czujników błysku pokazano na **rysunku 4**. Działanie wejść czujników uzależnione jest od typu pola. Poszczególne wejścia przyporządkowane są do konkretnych przedziałów. Sposób działania niewykorzystanych standardowo wejść może być powiązany z działaniem standardowych wejść. Może być to wykorzystane do zabezpieczania przedziałów sąsiedniego pola lub zdublowania czujników.

Badania łukoodporności rozdzielnic e<sup>2</sup>ALPHA, przeprowadzone w ramach badań typu w akredytowanych jednostkach badawczych, potwierdziły skuteczność przyjętych i stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Skutki wewnętrznych zwarć łukowych zawsze ograniczały się do badanego pola, niszcząc to pole, ale też spełniając wszystkie kryteria łukoochronności, zgodnie z normą przedmiotową. Na **rysunku 5** pokazano przykładowe zdjęcie z nieudanej próby łukowej rozdzielnic, która nie spełnia warunku łukoochronności. **Rysunek 5** pokazuje pole rozdzielnic e<sup>2</sup>ALPHA po pozytywnych próbach wewnętrznego zwarcia łukowego w przedziałach przyłączowym i wyłącznikowym oraz zdjęcie przedziału przyłączowego rozdzielnic e<sup>2</sup>ALPHA zaraz po wystąpieniu zwarcia łukowego i zadziałaniu zabezpieczenia łukoochronnego ARC, które miało miejsce w eksploatacji, wskutek eksplozji głowicy kablowej kable odpływowe. Na podstawie rejestracji prądów i napięć z zaistniałego zwarcia łukowego, pokazanej na **rysunku 6**, można wnioskować, że całkowity czas od chwili zaistnienia zwarcia do jego eliminacji wyniósł około 40 ms. Jest to całkowity czas zadziałania zabezpieczenia, wraz z czasem własnym wyłączenia wyłącznika e<sup>2</sup>BRAVO. W tak krótkim czasie zwarcia łukowego w rozdzielnic nie doszło do dra-



Rys. 6. Rejestracja prądów i napięć zdarzenia łuku awaryjnego rys. W. Chmielak

stycznych skutków tego zwarcia i nieodwracalnego jej zniszczenia. Jedyne widoczne ślady tego zwarcia to uszkodzona głowica kablowa, delikatnie wypalona izolacja zewnętrzna ograniczników przepięć oraz drobne ślady okopcenia na torach prądowych między uziemnikiem i ogranicznikami przepięć.

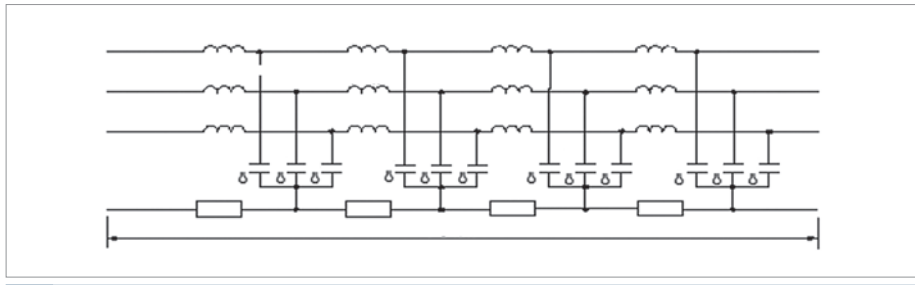
Zgodnie z informacjami uzyskanymi od klienta, u którego zdarzenie miało miejsce, całkowity czas od chwili wystąpienia zwarcia do momentu pełnego przywrócenia rozdzielnic do pracy wyniósł około 6 godzin. Oczywiście niezbędne było oczyszczenie przedziału przyłączowego rozdzielnic, wymiana uszkodzonych ograniczników przepięć, na które przeniósł się łuk elektryczny, oraz głowicy kablowej.

### Wykrywanie, rejestracja i dwustopniowa eliminacja zjawiska ferorezonansu

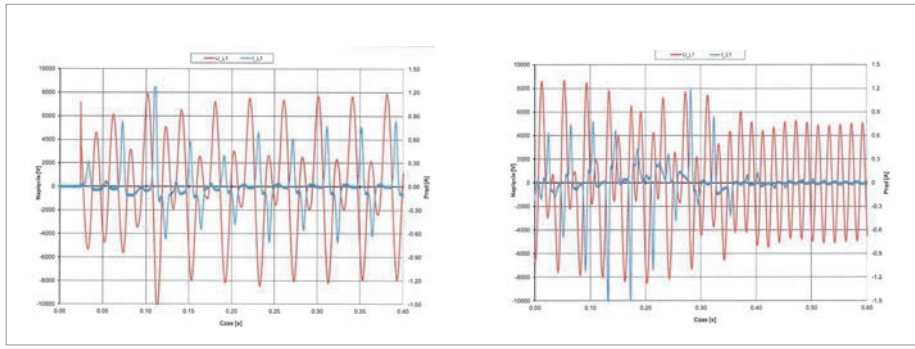
Zjawisko ferorezonansu jest uważane za jedną z podstawowych przyczyn uszkodzeń przekładników napięciowych instalowanych w układach elektroenergetycznych. Skutkiem ferorezonansu jest wzrost prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika, wynikający ze znacznego nasycenia rdzenia, co prowadzi do termicznego zniszczenia układu izolacyjnego. Mimo, że zjawisko ferorezonansu jest znane już od ponad stu lat, nadal nie zostały jednoznacznie określone kryteria jego powstawania i nie opracowano skutecznych metod jego eliminacji. Ze względu na zagrożenia, jakie stwarza to zjawisko, jest ono nadal przedmiotem zainteresowania ośrodków badawczych oraz służb eksploatacyjnych. Stany zakłóceniowe będące wynikiem ferorezonansu mogą również spowodować błędne zadziałanie elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

Drgania ferorezonansowe w układach elektroenergetycznych powstają w wyniku szere-

gowego lub równoległego połączenia liniowej pojemności z nieliniową indukcyjnością. W przypadku szeregowego połączenia tych reaktancji może dojść do ferorezonansu napięć, natomiast przy połączeniu równoległym – do ferorezonansu prądów. Z praktycznego punktu widzenia nieliniową indukcyjność w układach elektroenergetycznych stanowi najczęściej indukcyjność odwzorowująca zjawisko magnesowania rdzenia transformatora oraz przekładników napięciowych. Nieliniowy charakter tych obwodów utrudnia analizę tego zjawiska, ze względu na odkształcenia przebiegów prądów i napięć w momencie jego wystąpienia. Przemagnesowanie rdzenia przekładnika prowadzi do jego przegrzania i uszkodzenia izolacji, w tym – czasem – do eksplozji. Dodatkowo dochodzi do przepięć w postaci drgań ferorezonansowych napięć, co może negatywnie wpływać na inne elementy układów elektroenergetycznych. Występowanie przepięć dorywczych w postaci drgań ferorezonansowych jest uzależnione od konfiguracji układu elektroenergetycznego oraz od parametrów jego poszczególnych elementów. Istotną rolę odgrywa sposób połączenia punktu neutralnego układu z ziemią. W układach wysokich napięć pracujących z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym drgania ferorezonansowe mogą wystąpić przede wszystkim wtedy, gdy w wyniku pewnych czynności łączeniowych powstanie szeregowy lub szeregowo-równoległy układ drgający. W przypadku układów elektroenergetycznych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym do ferorezonansu może dojść w wyniku nagłej zmiany napięcia sieci będącej wynikiem zwarcia doziemnego. Na skutek tych zmian powstaje równoległy lub szeregowo-równoległy układ drgający. Bezpośrednią przyczyną powstawania ferorezonansu w sieci może być dowolna zmiana jej konfiguracji



Rys. 7. Model linii rys. W. Chmielak



Rys. 8. Przykłady rejestracji napięcia i prądu po stronie pierwotnej przekładników napięciowych w fazie L1 po podaniu napięcia na szyny rozdzielni i wyzwolenie oscylacji ferorezonansowych oraz wytlumienie ferorezonansu rys. W. Chmielak

cji lub zakłócenia, takie jak załączenie napięcia czy powstanie i włączenie zwarcia jednej fazy z ziemią. Przy dużym nasyceniu rdzeni przekładników przebieg napięcia punktu gwiazdowego sieci jest znacznie odkształcony i ma cechy drgań relaksacyjnych.

Zjawisko ferorezonansu, chociaż objawia się tylko w przebiegach napięć doziemnych i odpowiednich prądów, jest groźnym zakłóceniem w pracy sieci. Na skutek towarzyszących temu zjawisku przepięć i przetężeń możliwe jest uszkodzenie elementów sieci, tj. przekładników napięciowych czy linii kablowych. Ponadto ferorezonans podnosi potencjał punktu neutralnego układu, co powoduje pojawienie się składowej zerowej napięcia, mogącej fałszować działania układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych na modelu fizycznym GPZ SN z izolowanym punktem neutralnym oraz na modelach symulacyjnych odwzorowujących rzeczywiste układy elektroenergetyczne. Wykonano wielowariantową analizę wpływu zmiany konfiguracji sieci na możliwość inicjacji drgań relaksacyjnych.

W ramach badań przemysłowych prowadzonych przez firmę Elektrometal Energetyka S.A. opracowano szybki algorytm adaptacyjny do detekcji zjawiska ferorezonansu, z wykorzystaniem dowolnego napięcia fazowego ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ), jak również napięcia składowej zerowej  $U_0$ . Al-

gorytm zaimplementowano w sterowniku polowym e<sup>2</sup>TANGO, a do wykrywania zjawiska ferorezonansu użyto poszczególnych napięć fazowych. Opracowany układ eliminacji ferorezonansu zawiera dwa stopnie: pierwszy służy do zwierania uzwojenia otwartego trójkąta przekładników napięciowych (sygnał  $U_0$ ), drugi – do zwierania pojedynczych uzwojeń wtórnych przekładników napięciowych, i może być przyłączony zarówno do uzwojeń otwartego trójkąta, jak i na innych rdzeniach.

### Ultraszybkie wykrywanie zwarć z wykorzystaniem fal wielokrotnie odbitych

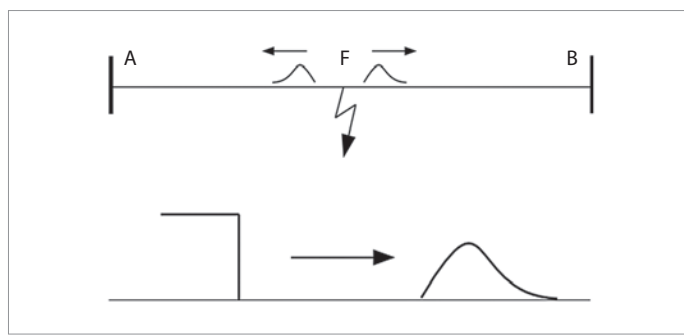
Wykrywanie zakłóceń oparto na pomiarze fal propagujących się linią elektroenergetyczną, które mają swoje źródło w nagłych zmianach napięcia i rozchodzą się w obydwu kierunkach od miejsca wystąpienia zdarzenia, wzdłuż linii elektroenergetycznej. Na **rysunku 9**, przedstawiono ilustrację propagacji fal elektromagnetycznych linią elektroenergetyczną na przykładzie zdarzenia, którym jest wystąpienie zwarcia. Zakłócenie w linii elektroenergetycznej łączącej szyny zbiorcze stacji A i B, wskutek którego nastąpiło nagłe obniżenie napięcia w miejscu zwarcia, powoduje wygenerowanie dwóch fal, propagujących się w przeciwnych kierunkach do szyn stacji A i B. Wygenerowane fale mają pionowe czoło w miejscu wystąpienia zwarcia i są tłumione wraz z przebytą drogą, co powo-

duje zmniejszenie ich amplitudy oraz wydłużenie czoła fali – jak pokazano na **rysunku 9**.

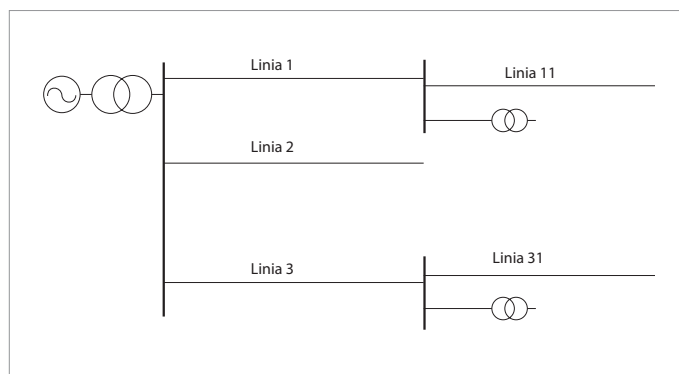
Fale są propagowane i tłumione w ośrodkach jednorodnych. W miejscach nieciągłości, rozumianej jako zmiana impedancji falowej ośrodków, część energii fali ulega odbiciu, a część jest przekazywana dalej, za miejsce nieciągłości. Takimi miejscami nieciągłości są szyny stacji, miejsca zwarcia oraz połączenia – szczególnie te, które zmieniają przekrój lub rodzaj linii elektroenergetycznej. Stosunek energii przekazanej i odbitej jest związany z impedancją falową ośrodków za i przed nieciągłością, na której następuje odbicie. Prędkość propagacji fal jest równa około 98% prędkości światła w liniach napowietrznych oraz około 50% prędkości światła w liniach kablowych. Różnica jest związana z pojemnościami poprzecznymi tych linii, których przeładowanie odpowiada za mechanizm propagacji fali. Energia użyteczna propagowanych fal zawiera się w częstotliwościach z zakresu 10–600 kHz. Dokonując pomiaru przebiegów wysokiej częstotliwości, układ automatyki zabezpieczeniowej jest w stanie zidentyfikować fale propagujące się linią SN na skutek zwarcia oraz ich właściwości, takie jak czas, amplituda i polaryzacja. Na ich podstawie, jeszcze przed przepływem prądu zwarcia o częstotliwości 50 Hz, układ automatyki jest w stanie w czasie setek mikrosekund wykryć zwarcie, przeanalizować i podać sygnał na otwarcie wyłącznika.

Opracowano i opatentowano jednostronny układ pomiarowy zawierający sensory prądu oraz sensory napięcia, zainstalowane na jednym końcu linii SN – od strony zasilania. Układ pomiarowy musi się składać z co najmniej jednego sensora prądu – umocowanego bezpośrednio na linii, bez ingerencji w jej ciągłość – oraz z co najmniej jednego sensora napięcia. Sygnały pomiarowe w postaci wartości chwilowych prądu lub pochodnej prądu są wprowadzane bezpośrednio w postaci sygnałów elektrycznych: prądu oraz napięcia, na zaciski pojedynczego urządzenia pomiarowego, zainstalowanego na tym samym końcu linii energetycznej. Pochodne prądów mogą być pierwszego, drugiego lub wyższych rzędów.

Weryfikacja modeli propagacji sygnałów falowych w sieciach elektroenergetycznych została przeprowadzona przy wykorzystaniu aplikacji PSCAD oraz na pracującej sieci elektroenergetycznej średniego napięcia. Przeprowadzono badania symulacyjne dla sieci izolowanej, kompensowanej oraz uziemionej przez rezystor. Zakres weryfikacji obejmował analizy zwarć doziemnych oraz dwu- i trójfazowych w różnych,



Rys. 9. Przykład propagacji fal elektromagnetycznych od miejsca wystąpienia zakłócenia oraz jej tłumienia wraz z oddalaniem się od miejsca zakłócenia  
rys. W. Chmielak



Rys. 10. Schemat rozważanej sieci elektroenergetycznej rys. W. Chmielak

określonych miejscach sieci. Część badań symulacyjnych potwierdzono w warunkach rzeczywistych, dokonując zamknięcia na zwartą linię elektroenergetyczną w różnych odległościach od stacji elektroenergetycznej. Badania w warunkach rzeczywistych wykazały potrzebę opracowania algorytmów korekcji sygnałów przenoszonych przez przekładniki o zadanej transmitancji określonej na podstawie wcześniejszych pomiarów małosygnałowych.

## I Podsumowanie

Nowe funkcje zabezpieczeniowe, realizowane przez sterowniki połowe typu e<sup>2</sup>TANGO, umożliwią współczesnym urządzeniom EAZ jeszcze lepszą diagnostykę i analizę chronionych urządzeń i obiektów oraz poprawę niezawodności zasilania odbiorców.

Wewnętrzne zwarcie łukowe w rozdzielnicach średniego napięcia jest zjawiskiem rzadkim, ale nie niemożliwym. Skutki takiego zwarcia mogą być katastrofalne i niezwykle kosztowne. Ponadto mogą powodować zagrożenie dla zdrowia i życia ludzkiego. Zabezpieczenie łukochronne ARC sterownika połowego e<sup>2</sup>TANGO wraz z krótkim czasem własnym wyłączania wyłącznika próżniowego e<sup>2</sup>BRAVO pozwala na bardzo szybkie przerwanie prądu zwarciego, w czasie nawet poniżej 40 ms. Tak szybka reakcja i przerwanie stanu awaryjnego istotnie ogranicza skutki zwarcia łukowego w rozdziel-

nicy, sprawiając, że możliwe jest szybkie ponowne przywrócenie zasilania, a także ograniczając konsekwencje i koszty takiego zdarzenia.

Szybka detekcja i skuteczna eliminacja zjawiska ferorezonansu jest szczególnie istotna dla układów elektroenergetycznych – ze względu na możliwość uszkodzenia zainstalowanych w nich przekładników napięciowych oraz kabli, co może prowadzić do zwarc łukowych i znacznie poważniejszych strat. Wbudowanie zabezpieczenia od ferorezonansu w sterownik połowy umożliwia nie tylko większą kontrolę nad działaniem tego zabezpieczenia, ale też pozwala na logiczne powiązanie z innymi zabezpieczeniami. Możliwość rejestracji wykrywanych zdarzeń wystąpienia ferorezonansu, łącznie z zapisem przebiegów prądów i napięć, pozwala na dokładniejszą analizę tego zjawiska i dopasowywanie się do działania zabezpieczenia do specyfiki układu, w którym to zjawisko występuje.

Jednostronny układ pomiarowy wraz z urządzeniem pomiarowym implementującym metodę detekcji zwarc na podstawie fal wielokrotnie odbitych, propagujących się liniami SN, może zostać zastosowany w rozdzielnicach SN w celu wydłużenia ich czasu życia, zmniejszenia strat materiałowych, finansowych i procesowych, będących następstwem zwarc występujących w liniach elektroenergetycznych SN. Wdrożenie jednostronnego układu pomiarowego wraz z metodą detekcji, będącego przedmiotem wynalazku, jest mniej skomplikowane i tańsze w porównaniu do układów dwustronnych. Wynalazek pozwala na poprawę bezpieczeństwa zasilania obiektu, w którym został zainstalowany, ochronę aparatury rozdzielczej jak również poprawę bezpieczeństwa obsługi i osób przebywających w pobliżu urządzeń ruchu elektrycznego.

\* \* \*

W artykule zaprezentowano wyniki badań przemysłowych i prac rozwojowych zrealizowanych przez firmę Elektrometal Energetyka S.A. w ra-

mach projektu „Budowa zintegrowanych systemów wspomagających i optymalizujących prace oraz bezpieczeństwo rozdzielnic SN”. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Osii Priorytetowej I „Wykorzystanie działalności badawczo-rozwojowej w gospodarce” Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014–2020.

## I Literatura

1. B. Koch, J. Maksymiuk, Łukoodporność rozdzielnic osłoniętych i symulacja zwarc łukowych, OWPW, Warszawa 2007.
2. IEEE 1584-2018 IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.
3. PN-EN 62271-200:2012 Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza. Część 200: Rozdzielnice prądu przemiennego w osłonach metalowych na napięcie znamionowe powyżej 1 kV do 52 kV włącznie.
4. J. Maksymiuk, Niezawodność maszyn i urządzeń elektrycznych, OWPW, Warszawa 2003.
5. W. Chmielak, Łukoodporność rozdzielnic w osłonie metalowej, „Wiadomości Elektrotechniczne” R. 90, nr 2/2022.
6. M. Pawłowski, Ferorezonans w układach pomiarowych sieci zasilających, „Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa” nr 8 (486) 2011.
7. P. Suchorolski, Ferorezonans w sieciach średnich napięć jako zagrożenie dla poprawnej pracy elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, Wiadomości Elektrotechniczne” 1(9):37-46.
8. J. Karolak, J. Przybysz, J. Wiśniewski, Zjawiska ferorezonansowe w sieciach elektroenergetycznych wysokiego napięcia, „Przegląd Elektrotechniczny” R 93, nr 11/2017.
9. D. Sajewicz, D. Rybak, T. Klonowski, Zabezpieczenia eliminacyjne w urządzeniach EAZ, metoda falowa detekcji zwarc występujących w liniach SN, „Wiadomości Elektrotechniczne” R. 91, nr 5/2023.

## ABSTRACT

### Solutions supporting safety and reliability of MV power equipment

The article discusses selected implemented solutions produced by Elektrometal Energetyka SA supporting the safety and reliability of MV power equipment, such as: arc protection and feroresonance protection as well as predictive algorithms for detecting motor damage.

**Keywords:** arc protection, feroresonance protection, predictive algorithms, wave protection.