

Zintegrowane nowoczesne układy do kompleksowej kompensacji ziemnozwarciowej w sieciach średnich napięć

Integrated modern systems for exclusion of earth fault compensation in medium voltage networks

Streszczenie: Współczesne sieci średniego napięcia charakteryzują się znacznymi wartościami pojemności doziemnych. Coraz bardziej istotną staje się w nich konieczność właściwej kompensacji. Typowym rozwiązaniem w takich sieciach jest stosowanie transformatorów uziemiających połączonych z dławikiem gaszącym o odpowiedniej indukcyjności. Artykuł ten opisuje urządzenie spełniające obie te funkcje jednocześnie, dając możliwość efektywniejszego wykorzystania powierzchni stacji średniego napięcia.

Abstract: Significant earthing capacitance becomes typical for modern middle voltage networks. Hence, the need of compensation is more and more necessary. The typical solution consists of the set of earthing transformer connected to the arc-suppression coil of the appropriate inductance. This paper deals with a device combining both functions giving opportunity for more effective utilization of middle voltage station area.

Słowa kluczowe: transformatory, dławiki, transformatory uziemiające, dławiki gaszące, prądy ziemnozwarciowe

Keywords: transformers, reactors, earthing transformers, arc-suppression coil, earthing currents

Wprowadzenie

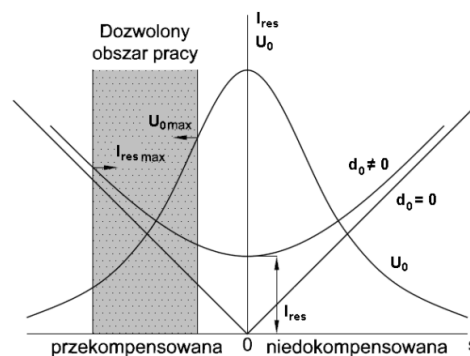
Sieci rozdzielcze SN są najbardziej rozbudowaną strukturą energetyczną w Polsce. Ze względu na ten fakt, te sieci są dotykane największą liczbą zakłóceń, z których około 70% stanowią zwarcia doziemne. Intensywność występowania takich stanów awaryjnych jest relatywnie duża. Z analiz wynika, że w ciągu roku na 100 km przypada od kilku do kilkudziesięciu doziemień [1,2]. Znaczną ich część są to zwarcia nietrwałe związane z zainicjowaniem łuku elektrycznego, które są podtrzymywane są poprzez napięcie sieci. Istotnym czynnikiem pozwalającym na samoistne wygaszenie takiego łuku elektrycznego jest stan skompensowania sieci w trakcie przepływu prądów ziemnozwarciowych. Urządzeniem pozwalającym na kompensację w krajowych sieciach zwykle jest dławik gaszący (cewka Petersena) podłączony w punkcie neutralnym sieci SN. Dzięki stosowaniu tego typu urządzeń znacznie poprawiają się wskaźniki pewności zasilania SAIDI, SAIFI, MAIFI [3,4,5]. Istotne jest także, że w miejscu wystąpienia doziemienia dławik zmniejsza poziom zagrożenia porażeniem oraz może mieć korzystny wpływ na pracę zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Potrzeba kompensacji oraz kryteria prawidłowej kompensacji ziemnozwarciowej

Z definicji doziemienie jest to zwarcie przewodu fazowego z ziemią, natomiast nie oznacza to że linia napowietrzna jest zerwana i leży na ziemi. Doziemienie jest również w przypadku uszkodzenia izolacji pomiędzy uziemionym słupem napowietrzny a przewodem fazowym. Przypadkiem uszkodzonej izolacji może być np. pęknięty izolator porcelanowy, którego uszkodzenie zmniejsza drogę upływu powodując zwarcie doziemne. Podczas wystąpienia doziemienia prąd zwarcia może mieć wartość 10 A ale może mieć wartość 100 A. Występowanie tak dużego prądu przy napięciu 100 V powoduje energię rzędu 10 kW i wystąpienie łuku elektrycznego. Taka energia może wywoływać pożary, które są niebezpieczne dla zabezpieczeń oraz całej linii SN. Przepływ prądu 100 A w miejscu doziemienia może prowadzić do występowania dużych napięć dotykowych i krokowych jest to bardzo niebezpieczne dla ludzi oraz zwierząt [6].

Sposobem na uniknięcie występowania niebezpiecznych zwarc doziemnych jest skompensowanie

prądu zwarcia doziemnego. Im mniejszy prąd zwarcia tym lepiej, oczywiście nie da się tego prądu zmniejszyć do zera a w niektórych przypadkach może dojść do utraty kompensacji sieci co może powodować bardzo duże prądy zwarcia. Kompensacja ziemnozwarciowa spełnia funkcję tylko wtedy, gdy reaktancja cewki Petersena jest równa reaktancji pojemnościowej sieci. W praktyce aby uniknąć zjawisk rezonansowych najczęściej ustawia się reaktancję dławika, tak by wypadkowy obwód posiadał charakter lekko indukcyjny. Na rysunku 1 przedstawiono zalecany obszar pracy dławika kompensacyjnego [1]



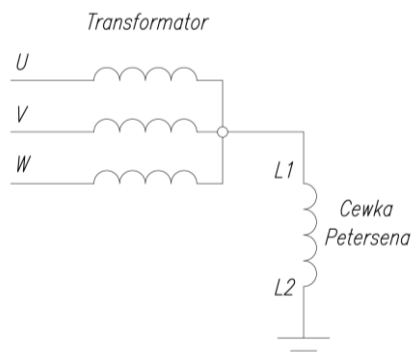
Rys.1. Zalecany zakres pracy dławika kompensującego w sieci SN

Dobór odpowiedniej wartości reaktancji cewki można wykonać według dwóch kryteriów: wartość współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej K oraz dopuszczalnej wartości składowej biernej prądu resztkowego I_{res} . Prawidłowo dobrany dławik ogranicza prądy ziemnozwarciowe dzięki czemu łuk elektryczny samoistnie gaśnie a niebezpieczne skutki (napięcie krokowe w miejscu doziemienia) są ograniczone.

Rozwiązania stosowane w polskich sieciach SN

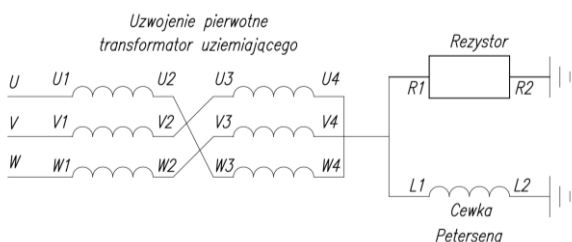
Podstawowym sposobem kompensacji ziemnozwarciowej jest podłączenie do transformatora z wyprowadzonym punktem gwiazdowym cewki Petersena. Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie sposób podłączenia cewki Petersena do punktu gwiazdowego transformatora.

Jest to najprostsze rozwiązanie kompensacji ziemnozwarciowej jednak wprowadza dużą impedancję zerową transformatora i dla jej ograniczenia konieczne jest stosowane dodatkowe uzwojenia połączone w trójkąt.



Rys.2. Sposób podłączenia dławika gaszącego do transformatora

Aktualnie najczęściej stosowanym sposobem kompensacji prądów ziemno-zwarciowych jest transformator uziemiający tworzący punkt zerowy wraz z cewką Petersena oraz rezystorem składowej czynnej. Na rysunku 3 przedstawiono schemat podłączenia wszystkich urządzeń do sieci SN.

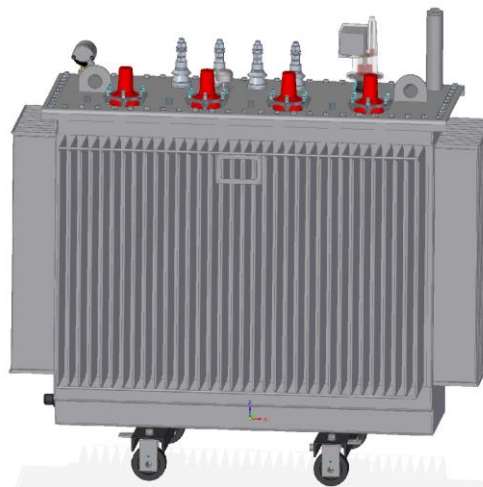


Rys. 3 Schemat podłączenia transformatora uziemiającego wraz z dławikiem gaszącym (cewką Petersena) oraz rezystorem składowej czynnej (AWSZCz)

Transformator uziemiający jest przyłączony do sieci SN pracując w trybie ciągłym. Uzwojenie wtórne tego transformatora zasila na przykład potrzeby własne stacji GPZ lub innego obiektu. Po stronie górnego napięcia transformator uziemiający najczęściej produkowany jest z grupą ZN (zygzak z wyprowadzonym punktem zerowym). Taka grupa połączeń pozwala na zmniejszenie reaktancji podłużnej transformatora dla składowej zerowej. Podczas wystąpienia doziemienia pojawia się asymetria napięcia na wyprowadzonym punkcie zerowym wymuszając przepływ prądu przez cewkę Petersena. Odpowiednie ustawienie jej indukcyjności umożliwia prawidłową kompensację prądów ziemnozwarciowych. Transformatory uziemiające z dodatkowym uzwojeniem potrzeb własnych zwykle wykonywane są z grupą połączeń ZNyn5 lub ZNyn11, choć też są znane układy ZNzn0 lub układy z dodatkowym uzwojeniem połączonym w trójkąt. Uzwojenie strony niskiego napięcia połączone w zygzak dodatkowo zapewnia mniejsze asymetrie napięcia podczas niesymetrycznego obciążenia. Pozwala to na zapewnienie stabilnego i pewnego zasilania stacji GPZ lub innego zasilania po stronie nn. Rysunek 4 przedstawia transformator uziemiający z potrzebami własnymi typu BTUO 693/20HK z potrzebami własnymi 350 kVA w wersji hermetycznej:

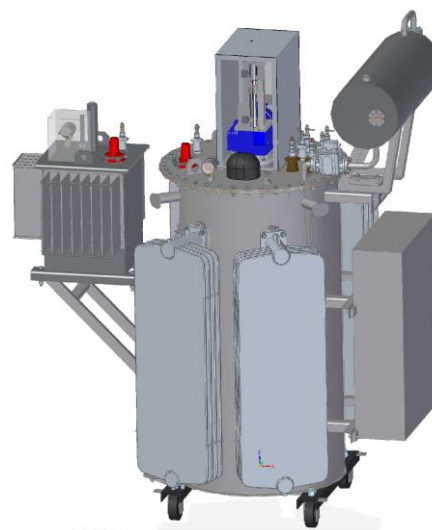
Kolejnym niezbędnym elementem kompensacji ziemnozwarciowej jest dławik gaszący (cewka Petersena)

nadażny lub z przełącznikiem beznapięciowym. Dławik gaszący nadażny jest to urządzenie dostosowujące się do aktualnej pojemności sieci SN poprzez układ automatyki. Wersja z przełącznikiem beznapięciowym pozwala na ręczne dostosowanie reaktancji dławika do pojemności sieci. Dławik gaszący jest podłączony pośrednio (przez odłącznik) lub



Rys.4. Transformator uziemiający typu BTUO 693/20HK produkowany przez firmę Trafta

bezpośrednio do wyprowadzonego punktu zerowego transformatora uziemiającego. Drugi z zacisków dławika gaszącego jest trwale uziemiony. Podczas wystąpienia zwarcia doziemnego w sieci, dławik kompensuje prąd pojemnościowy sieci ograniczając wypadkową wartość prądu w miejscu doziemienia. Na rysunku 5 przedstawiono dławik gaszący wraz z zamontowanym na nim rezystorem pierwotnym typu AWSZCz.



Rys.5. Dławik BDGORS produkowany przez firmę Bezpól

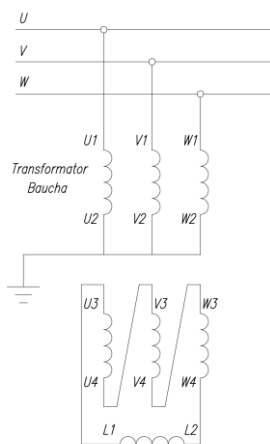
Rezystor pierwotny typu AWSZCz jest przeznaczony do wymuszania składowej czynnej prądu zwarcia z ziemią w skompensowanych sieciach średniego napięcia i wspomaga działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Rezystor jest podłączony równolegle do dławika kompensującego za pomocą wysokonapięciowego łącznika próżniowego. Załączenie rezystora następuje podczas niegasnących samoistnie zwarć doziemnych w sieci. Wówczas dodatkowe zwiększenie składowej czynnej prądu

zwarcia z ziemią i obniża napięcie w miejscu doziemienia [1,5].

Inne znane rozwiązania kompensacji ziemnozwarciowej

Transformator Baucha

Transformator Baucha aktualnie jest rzadko stosowanym rozwiązaniem. Rdzeń magnetyczny tego transformatora składa się z czterech kolumn z czego na trzech nawinięte jest uzwojenie pierwotne oraz wtórne. Uzwojenie pierwotne przyłączone jest do sieci natomiast końce tego uzwojenia są połączone w gwiazdę i uziemione. Pomocnicze uzwojenie połączone jest w otwarty trójkąt i podłączone jest szeregowo z cewką dławika. Cewka ta jest wykonana na osobnym obwodzie magnetycznym co powoduje, że transformator Baucha składa się z transformatora czterokolumnowego oraz osobnego dławika dwukolumnowego. Na rysunku 6 przedstawiono elektryczne połączenie transformatora Baucha.



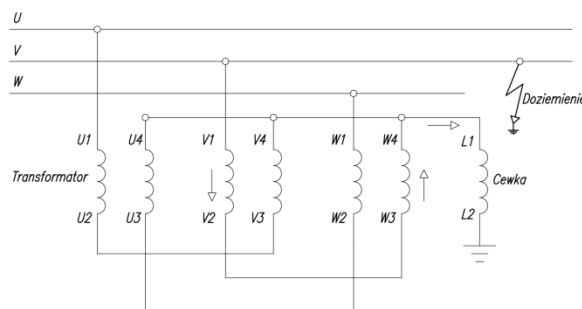
Rys.6. Schemat podłączenia transformatora Baucha z dodatkową cewką kompensacyjną ziemnozwarciową

Podczas braku zwarcia doziemnego, transformator Baucha działa jak zwykły transformator pracujący na biegu jałowym. Podczas wystąpienia doziemienia na sieci pojawiają się dodatkowe przepływy prądów przez uzwojenie pierwotne wzbudzające przepływ prądu w uzwojeniu wtórnym połączonym z dławikiem. Dławik ten stanowi indukcyjne obciążenie transformatora Baucha, dające się regulować. W wszystkich trzech kolumnach uzwojenia pierwotnego transformatora Baucha popłyną prądy zamykające się przez pojemność sieci, ziemię i punkt zerowy. Wszystkie prądy mają wektor przeciwny niż prąd zwarcia doziemnego. W związku z tym prąd zwarcia w fazie zostaje skompensowany [6,8]

Transformator Reithoffera

W sieciach SN bez wyprowadzonego punktu zerowego na transformatorze można zastosować transformator Reithoffera. Charakterystyczną cechą transformatora jest konstrukcja bez oddzielnego dławika. Oznacza to, że obwód magnetyczny (rdzeń) urządzenia składa się z czterech kolumn. Konstrukcja taka pozwala na swobodny przepływ strumienia składowej zgodnej (i przeciwnej) jak również strumienia składowej zerowej. Strumień składowej zerowej ma kierunek ten sam we wszystkich trzech kolumnach głównych (część transformatorowa) i zamyka się poprzez dodatkową czwartą kolumnę (część dławikowa). Kolumna dławikowa podobnie jak w typowym dławiku gaszącym posiada niemagnetyczną szczelinę dzięki czemu uzyskujemy linearną zależność pomiędzy prądem i napięciem składowej zerowej [6,8]. Na rysunku 7

pokazano zasadę podłączenia transformatora do sieci średniego napięcia.



Rys.7. Transformator Reithoffera – sposób podłączenia do sieci średniego napięcia

Zgodnie z rysunkiem transformator podłączony zostaje do sieci. Uzwojenie części transformatorowej zostało podłączone w zygzak (koniec pierwszego uzwojenia z początkiem drugiego w trójkąt, drugie uzwojenie w gwiazdę). Na rysunku zaznaczono rozptył prądów niesymetrii wywołanych napięciem niesymetrii w jednej fazie transformatora Reithoffera.

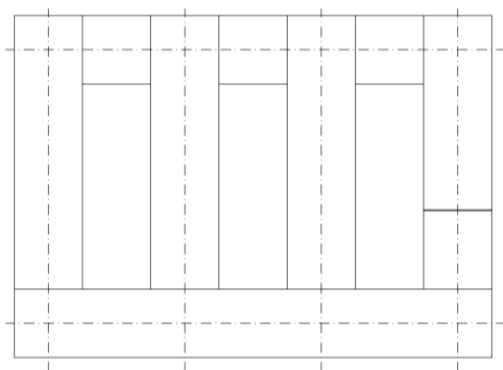
Przyczyny poszukiwania rozwiązań kompleksowych

Ciągła rozbudowa krajowej sieci średniego napięcia oraz potrzeba modernizacji linii powstałych w latach 60 XX wieku zmusza operatorów sieci do poszukiwania rozwiązań kompleksowych i kompaktowych. Głównymi przesłankami wprowadzenia zintegrowanych urządzeń są:

- Istniejące budynki stacji z ograniczoną ilością pól pod urządzenia,
- drożący grunt,
- ograniczona powierzchnia stacji (brak możliwości rozbudowy stacji np. stacja blisko zakładu przemysłowego),
- ograniczenia środowiskowe (brak możliwości wstawienia kolejnej misy olejowej),
- nakłady inwestycyjne (zaprojektowanie oraz zmiana planów zagospodarowania stacji wiąże się z dodatkowymi kosztami).

Model rozwiązania kompleksowego

W związku z powyższymi warunkami oraz zapotrzebowaniem rynku na zintegrowane rozwiązania firma „Trafta” postanowiła wykonać model urządzenia, które spełniałoby wszystkie funkcje potrzebne do uzyskania skompensowanego punktu gwiazdowego sieci w jednym kompleksowym urządzeniu. Urządzenie to objęte jest zgłoszeniem patentowym pod nazwą trafodławik. Model składał się z trzech kolumn stałych na których zostały nawinięte uzwojenia (patrzac od lewej na rysunku 8) uzwojenie transformatorowe fazy „U”, kolumna druga faza „V”, kolumna trzecia faza „W” oraz kolumny dławikowej. Kolumna dławikowa posiada niemagnetyczną szczelinę. Zmiana reaktancji dla składowej zerowej realizowana jest poprzez regulację grubości szczelin (może to być regulacja płynna). Na ostatniej kolumnie zostało nawinięte uzwojenie dławika gaszącego. W blachach rdzenia przewidziano możliwość regulacji szczeliny dzięki czemu można było przebadać zmiany napięć i prądów w poszczególnych ustawieniach.

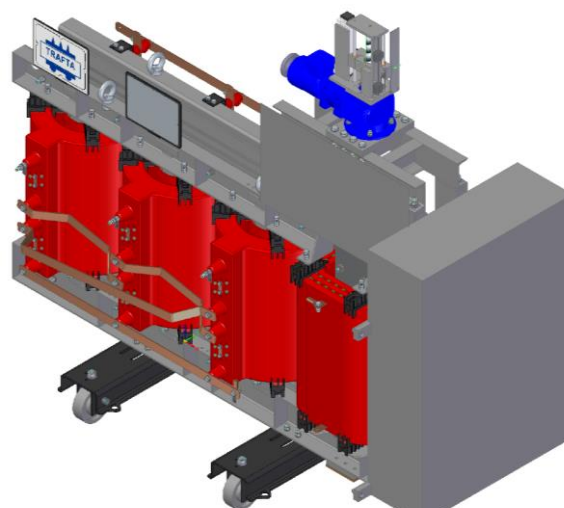


Rys.8. Uproszczony rysunek obwodu magnetycznego trafodławika

Dla celów badawczych przy poszukiwaniu najbardziej korzystnego układu połączeń trafodławik został tak zaprojektowany, by możliwe było skonfigurowanie go oraz przebadanie w różnych skojarzeniach grup połączeń oraz dla różnych wartości szczeliny dławikowej. Przeprowadzono badania w układach YNyn, YN(d)yn, ZNyn, ZN(d)yn oraz ZNzn. Na podstawie pomiarów stwierdzono, że najkorzystniejszą konfiguracją jest grupa ZNzn0. Dzięki zastosowaniu zygzaka po stronie pierwotnej części transformatorowej jest wyprowadzony punkt zerowy sieci a w przypadku doziemienia rozkład prądów zwarcia rozkłada się równomiernie na poszczególne fazy. Wyprowadzony punkt gwiazdowy jest bezpośrednio połączony z wyprowadzeniem fazowym dławika gaszącego natomiast drugi koniec uzwojenia dławika był trwale uziemiony. Pomiarzy wykazały, że najstabilniejsze dla całego urządzenia jest połączenie w grupę ZNzn0. Przy tej grupie połączeń nie jest wymagane zastosowanie dodatkowego uzwojenia trójkątowego. Dzięki zygzakowi na uzwojeniu uziemiającym przy wystąpieniu doziemienia prąd rozprzodza się równomiernie na trzech fazach. W przypadku uzwojenia niskiego napięcia (potrzeb własnych) w grupach D oraz Y, pojawiały się zakłócenia (spadki napięcia) wywołane przepływem prądu składowej zerowej. Wprowadzenie połączenia zygzag na uzwojeniu wtórnym zniwelowało problem do pomijalnej wartości.

Prototyp trafodławika ziemnozwarciowego regulowanego płynnie

Badania wykonane na modelu pozwoliły na przejście do fazy prototypu o parametrach adekwatnych do potrzeb energetyki: napięcie znamionowe sieci 15,75 kV, moc transformatora uziemiającego 546 kVA, moc dławika kompensacyjnego ziemnozwarciowego 546 kVAr, moc potrzeb własnych 100 kVA oraz napięcie zwarcia 4% (napięcie zwarcia odnosi się do transformatora uziemiającego i potrzeb własnych). Urządzenie zostało zaprojektowane wraz z nadążną kompensacją ziemnozwarciową. Całe urządzenie zostało wykonane w technologii suchej oraz otrzymało oznaczenie typu TTDUZR. Trafodławik TTDUZR 546/15 przedstawiono na rysunku 9.



Rys.9. Trafo-dławik typu TTDUZR 546/15

Trafodławik zbudowany został jako układ 4 kolumnowy pozwalający na zamontowanie wszystkich urządzeń opisanych wcześniej w jednym kompleksowym rozwiązaniu. Na potrzeby artykułu urządzenie zostało podzielone na trzy główne funkcje: transformator uziemiający, transformator potrzeb własnych oraz dławik kompensacyjny ziemnozwarciowy. Rdzeń urządzenia został wykonany z blachy zimnowalcowanej o obniżonej stratności. Dzięki zastosowaniu takiej blachy straty jałowe są na niskim poziomie co dodatkowo wpływa pozytywnie na ekonomikę eksploatacji jak i na środowisko.

Uzwojenia transformatorowe zostały umieszczone na kolumnach stałych rdzenia, którego budowa nie odbiega w znacznym stopniu od budowy rdzenia transformatora uziemiającego w standardowym wykonaniu. Uzwojenie zostało połączone w zygzag co pozwala na łatwe wyprowadzenie punktu zerowego dla części dławika gaszącego.

Uzwojenie transformatorowe potrzeb własnych strony niskiego napięcia o mocy 100 kVA pozwala na podłączenie zasilania potrzeb własnych stacji GPZ lub innego obiektu, który zapewni stabilne zasilanie dzięki zastosowaniu zygzak po stronie nn. W przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego na uzwojeniu wtórnym napięcie oraz prąd nie wzrosną w sposób odczuwalny dla całego zasilanego obiektu.

Uzwojenie dławikowe gaszące dzięki zastosowaniu ruchomej części magnetycznej pozwala regulować prąd kompensacji ziemnozwarciowej w zakresie od 10% do 100%. W tym przypadku jest to zakres od 6 A do 60 A. Mechanizm regulacji szczeliny dzięki wykorzystaniu automatyki dostosowuje się do odpowiedniej pojemności sieci, co pozwala na precyzyjne skompensowanie prądu ziemnozwarciowego. Równolegle trwają prace nad wersją olejową z płynną regulacją (z ruchomym rdzeniem) jak i wersje z regulacją skokową za pomocą zaczeów uzwojenia części dławikowej.

Podsumowanie

W XXI wieku bezpieczeństwo oraz stabilność pracy sieci SN jest koniecznością. W nowo budowanych obiektach oraz ich modernizacjach na stałe zagościło miejsce na:

transformator uziemiający, dławik gaszący oraz rezystor [10]. Na rysunku 10 przedstawiono zdjęcie z takiego GPZ.



Rys.10. Zespół urządzeń do kompensacji ziemnozwarciowej

Jak widać na rysunku 10 urządzenia zajmują sporo miejsca na obiekcie. Firma Trafta oferuje rozwiązanie znacznie ograniczające miejsce oraz koszty budowy stanowisk kompensacji ziemnozwarciowej. Trafodławiki suche oraz wersje olejowe z regulacją nadążną lub beznapięciową gwarantują prawidłowe działanie sieci oraz znacznie obniżają koszty i miejsce potrzebne do ich montowania. Na rysunku 11 przedstawiono trafodławik olejowy z regulacją beznapięciową.



Rys.11. Trafo-dławik typu TTDUO 546/15

Autorzy: mgr inż. Mateusz Skowron, Trafta, ul. 1-go Maja 152, 42-300 Myszków, E-mail: mateusz.skowron@trafta.pl; dr inż. Jacek Dziura, Trafta, ul. 1-go Maja 152, 42-300 Myszków, E-mail: jacek.dziura@trafta.pl; prof. dr hab. inż. Józef Lorenc, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jozef.lorenc@put.poznan.pl; mgr inż. Michał Torbus, Bezpól, ul. Partyzantów 21, 42-300 Myszków, E-mail: torbus.michal@gmail.com;

LITERATURA

- [1] Lorenc J., Staszak B., Borucki R., Torbus M., Kryteria regulacji nadążnej kompensacji ziemnozwarciowej w sieciach średniego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny* 2018, nr 10, s. 29-32
- [2] Lorenc J., Rakowska A., Limitation of Interruptions in Service of MV Distribution Systems by Improvement of Lines Insulation and Fast Localising of Earth Fault. *CIGRE 18th International Conference on Electricity Distribution. Conference proceedings Turin*, 2005.
- [3] Oramus P., Furgał J., Ground fault overvoltage analysis in distribution networks, *Przegląd Elektrotechniczny* 2015, nr 6, s. 149-152
- [4] Mohar T., Valenčič L., Bati D., Reliability impact factors analysis for distribution in Slovenia, *22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 10-13 June 2013*, Paper 1153
- [5] Andruszkiewicz J., Lorenc J., Olejnik B., Weychan A., Staszak B., Metod of Reducing the Effects of Repeated Ignition during Earth Faults in Compensated Medium Voltage Networks. *Energies - 2024*, vol. 17, iss. 1, s. 1-14
- [6] Sobota J., Porada M., Nowe systemy sieci SN I transformatory przeznaczone do tego celu. XXII Konferencja Naukowo-Techniczna Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów, 12-14 października Wisła-Jawornik, strona 185-193
- [7] Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, ISBN 978-83-7143-342-9, 2007
- [8] Jakubowski J., Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych (Fundamentals of overvoltage theory in power systems), PWN, Warszawa, 1968
- [9] Hoppel W., Sieci średnich napięć Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażeń. WNT, Warszawa, 2017