



DYNAMIKA ŁUKU ZWARCIOWEGO PRZEMIESZCZAJĄCEGO SIĘ WZDŁUŻ SZYN ROZDZIELNIC WYSOKIEGO NAPIĘCIA

dr hab. inż. Roman Partyka / Politechnika Gdańska
mgr inż. Daniel Kowalak / Politechnika Gdańska

1. WSTĘP

Podczas zwarc łukowych działanie elektrodynamiczne prądu powoduje przemieszczanie się łuku wzdłuż szyn. Wskutek szybkiego nagrzewania powietrza przez łuk wewnątrz rozdzielnicy, wzrastające ciśnienie może stanowić zagrożenie dla drzwi i osłon rozdzielnic.

W rozdzielnicach osłoniętych z izolacją powietrzną skutki zwarc łukowych zależą od mocy łuku i czasu trwania zwarcia. Dlatego celowe jest minimalizowanie skutków cieplnych i elektrodynamicznych podczas zwarc łukowych, polegające przede wszystkim na skracaniu czasów trwania zwarc i ograniczaniu przemieszczania się łuku podczas jego wędrówki wzdłuż szyn.

2. INDUKCJA MAGNETYCZNA I SIŁY ELEKTRODYNAMICZNE MIĘDZY SZYNAMI

W stanach ustalonych i w przebiegach wolnozmiennych

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

zaś indukcja magnetyczna

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

gdzie:

H – wektor natężenia pola magnetycznego

J – wektor gęstości prądu

A – potencjał wektorowy.

Siła wypadkowa działająca na element przewodnika o objętości Ω , znajdującego się w polu magnetycznym, wyraża się zależnością:

$$\mathbf{F} = \int_{\Omega} \mathbf{J} \times \mathbf{B} d\Omega \quad (3)$$

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki obliczeń indukcji magnetycznej oraz sił elektrodynamicznych, działających na kolumny łuku podczas zwarc na szynach rozdzielnic średniego napięcia z izolacją powietrzną. Odstęp (w świetle) między szynami wynosił 120 mm, a spodziewane prądy zwarcowe od 4 kA do 8 kA. Przedstawiono też wyniki pomiarów średniej prędkości łuku zwarcowego w zależności od prądów oraz odległości między szynami. Wyznaczono i przedstawiono zależność zastępczej średnicy łuku od prądu łuku. Na podstawie wyników obliczeń: sił elektrodyna-

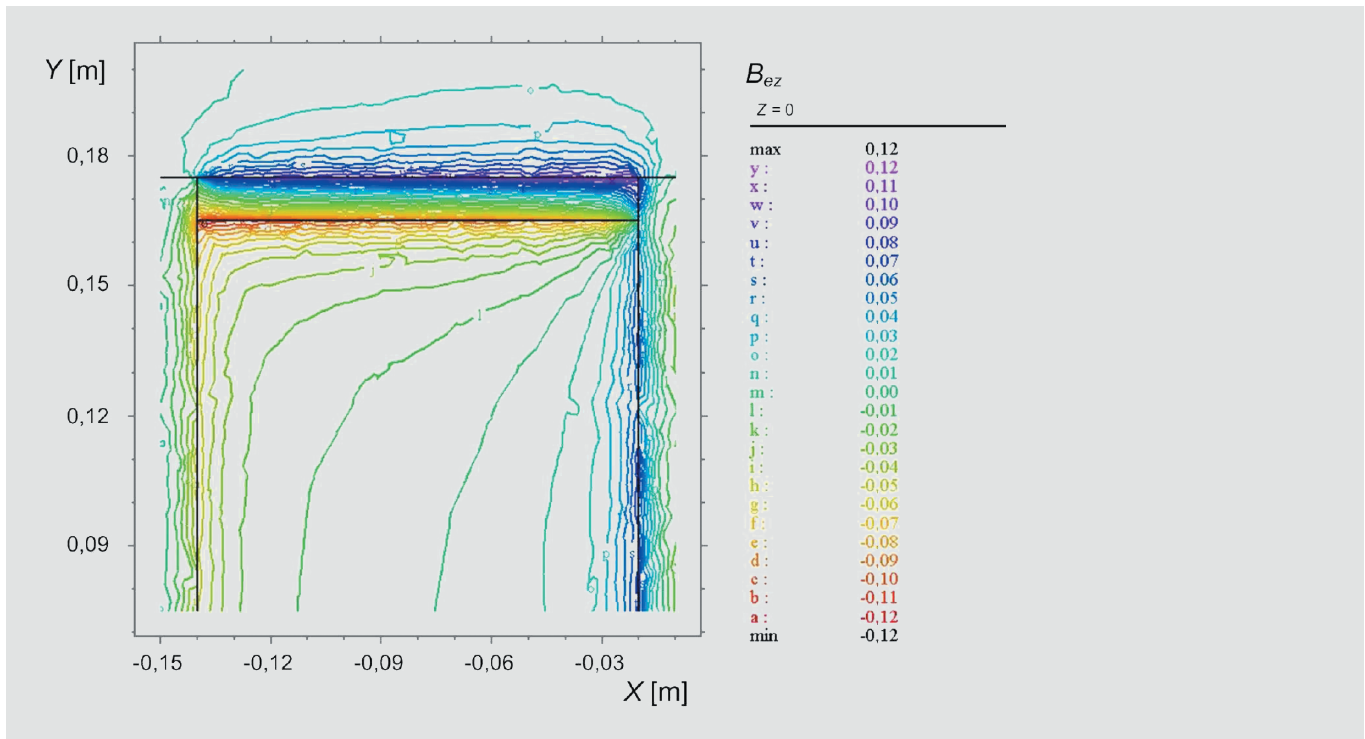
micznych działających na łuk oraz zastępczej średnicy łuku, jak również – wyników pomiarów prędkości łuku, przedstawiono zależność współczynnika oporu aerodynamicznego łuku od prądu łuku. W podsumowaniu stwierdzono między innymi możliwość zmiany kierunku ruchu łuku wskutek zmian kierunku sił elektrodynamicznych. Zwrócono uwagę na deformację kolumn łukowych i wzrost napięcia łuku, które powodują wzrost mocy łuku, a zatem większe skutki trójfazowych zwarc łukowych w rozdzielnicach.

3. WYNIKI OBLICZEŃ INDUKCJI ORAZ SIŁ

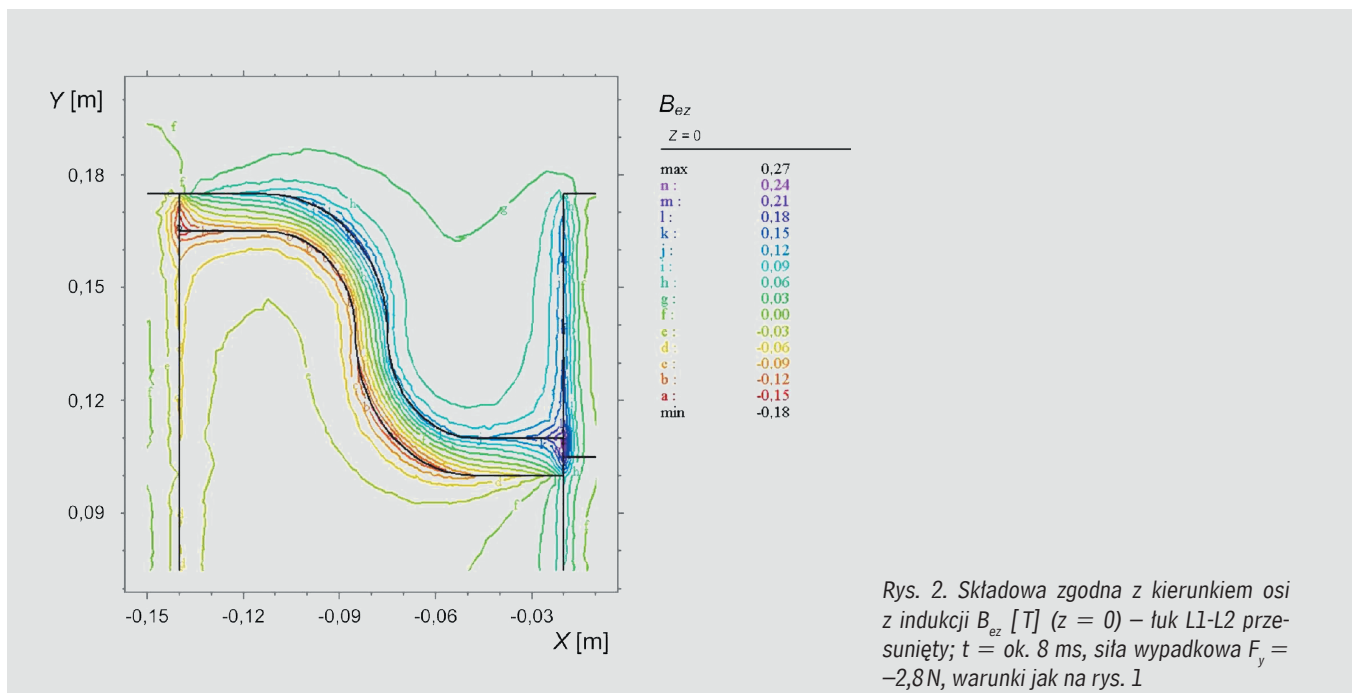
Analizie poddano płaski układ trzech szyn miedzianych o wymiarach przekroju poprzecznego 40x5 mm i 40x10 mm oraz odstęp między szynami 120 mm. W obliczeniach uwzględniono prądy zwarć łukowych w zakresie od 4 kA do 8 kA.

Na podstawie wcześniejszych badań stwierdzono, że podczas zwarcia łukowego trójfazowego na szynach ułożonych w jednej płaszczyźnie palą się dwa łuki – między fazą (szyną) środkową L2 a szynami zewnętrznymi L1 i L3 [2]. Wykorzystując zależności (1), (2) i (3), obliczono indukcję (rys. 1 i 2) oraz siły działające na łuk podczas zwarcia na szynach. Do obliczeń wykorzystano program Flex PDE v. 5.1.2 [1]. Przebieg siły wypadkowej, działającej na kolumnę łukową L1-L2 przedstawiono na rys. 3, a zależność średniej siły wypadkowej $F_{y\text{sr}}$ działającej na łuk L1-L2 (ułożony prostopadłe do osi szyn) od prądu łuku I_L przedstawiono na rys. 4.

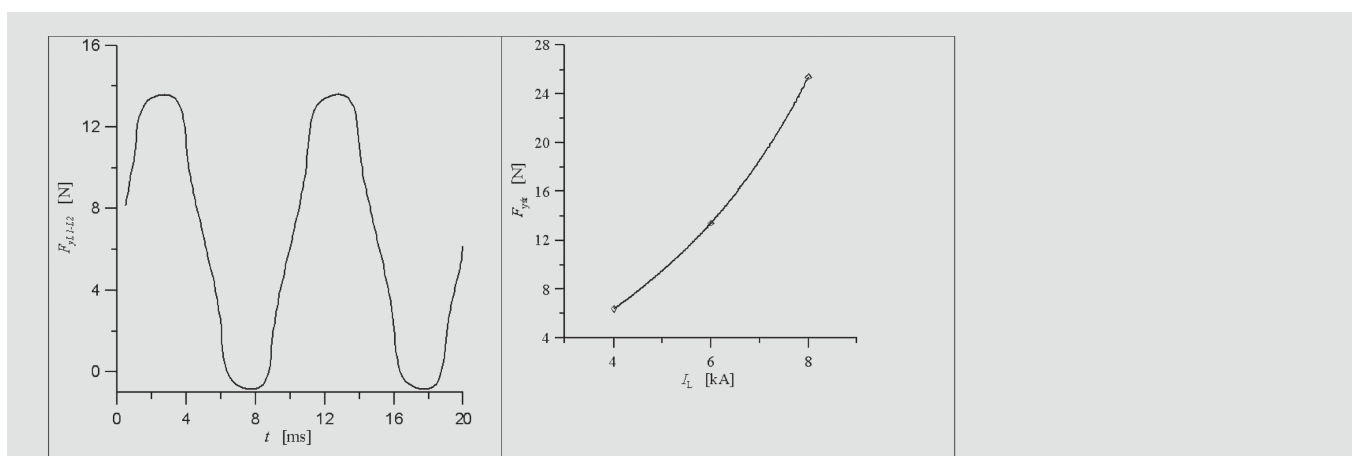
Zakładając, że w chwili powstania zwarcia wartość prądu w fazie L2 jest równa 0, po czasie ok. 8 ms siła wypadkowa działająca na kolumnę łukową L1-L2 ma wartość minimalną, a łuk przemieszcza się w stronę źródła zasilania. Na łuk działają jednocześnie dwie siły: od prądów szyny L1 i łuku (siła skierowana od źródła zasilania) i od prądów szyny L2 i łuku L1-L2 (siła skierowana do źródła zasilania). Takie współdziałanie sił powoduje deformację łuku i znaczne jego wydłużenie (rys. 2). Dalej powoduje to wzrost napięcia łuku. Deformacja łuku i przesunięcie stóp łuku zwiększa siły jednostkowe (przeciwnie skierowane), działające na łuk w pobliżu stóp łuku (rys. 5, krzywa 2).



Rys. 1. Składowa zgodna z kierunkiem osi z indukcji B_{ez} [T] ($z = 0$) podczas trójfazowego zwarcia łukowego – łuk L1-L2 prostopadły do osi szyn; $t = \text{ok. } 8 \text{ ms}$, prąd łuku $I_L = 4 \text{ kA}$, szyny 40x5 mm, siła wypadkowa $F_y = -0,82 \text{ N}$ (skierowana do źródła zasilania)

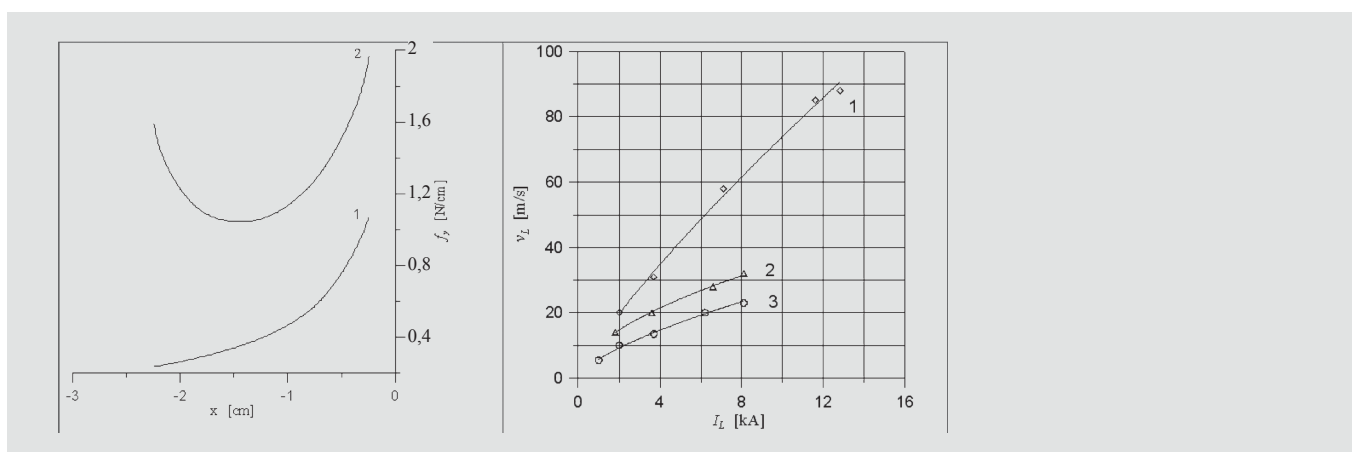


Rys. 2. Składowa zgodna z kierunkiem osi z indukcji B_{ez} [T] ($z = 0$) – łuk L1-L2 przesunięty; $t =$ ok. 8 ms, siła wypadkowa $F_y = -2,8N$, warunki jak na rys. 1



Rys. 3. Przebieg siły wypadkowej F_y działającej na kolumnę L1-L2; prąd łuku $I_L = 4$ kA, szyny 40x5 mm

Rys. 4. Zależność średniej siły wypadkowej $F_{y\text{sr}}$ działającej na łuk L1-L2 od prądu łuku I_L



Rys. 5. Zależność siły jednostkowej f_y działającej na łuk L1-L2 od odległości x (od krawędzi szyny L2 w kierunku szyny L1); 1 – łuk wg rys. 1, 2 – łuk wg rys. 2, warunki jak na rys. 1

Rys. 6. Zależność pomierzonej średniej prędkości łuku v_L wzdłuż trójfazowego płaskiego układu szyn od prądu łuku I_L i odległości między szynami d ; 1 – $d = 120$ mm, 2 – $d = 180$ mm, 3 – $d = 240$ mm [2]

4. PRĘDKOŚĆ ŁUKU

W analizie zjawisk towarzyszących zwarciom łukowym istotna jest prędkość przemieszczania się łuku wzdłuż szyn. Prędkość ta zależy od prądów zwarciovych i odległości między szynami. Analiza prędkości jest szczególnie istotna przy krótkich czasach wyłączenia zwarć z łukiem wędrującym, ponieważ przy tych samych prądach i odległościach między szynami moc i energia zwarcia łukowego będzie mniejsza w porównaniu z mocą i energią zwarć z łukiem stacjonarnym. Przy tych samych prądach i odległościach między szynami napięcie łuku wędrującego jest mniejsze od napięcia łuku stacjonarnego [2].

Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości łuku v_L , w zależności od prądów zwarciovych I_L przy różnych odległościach między szynami [2].

Zaobserwowano praktycznie proporcjonalną (w przybliżeniu liniową) zależność prędkości łuku v_L od prądu I_L .

Istnieją metody analityczne, umożliwiające obliczanie prędkości łuku. Prędkość łuku może być definiowana zależnością

$$v_L = \frac{k_{FL}}{c_L} \sqrt{\frac{F_y}{A_L \rho}} \quad (4)$$

gdzie:

v_L – prędkość łuku

k_{FL} – współczynnik zależny od rodzaju zwarcia

c_L – współczynnik oporu aerodynamicznego łuku

F_y – średnia siła oddziaływania elektrodynamicznego na łuk, np. na kolumnę łuku L1-L2

A_L – zastępcze pole powierzchni kolumny łukowej jako rzut na płaszczyznę prostopadłą do osi szyn

ρ – gęstość gazu.

Siła oddziaływania elektrodynamicznego łuku F_L jest proporcjonalna do kwadratu prądu I_L , a pole powierzchni A_L zwiększa się ze wzrostem prądu I_L . W obliczeniach należy też uwzględnić opór aerodynamiczny gazu wypełniającego rozdzielnicę, stawiany kolumnie łuku poruszającego się wzdłuż szyn. Do obliczenia prędkości łuku v_L wg zależności (4) niezbędne są wartości wyszczególnionych współczynników i wielkości, które najczęściej są wyznaczone doświadczalnie. Zastępcze pole powierzchni A_L wyznaczono na podstawie wyników obliczeń zastępczej średnicy łuku d_L . Według literatury [3] średnica łuku d_L chłodzonego w otoczeniu gazu wynosi

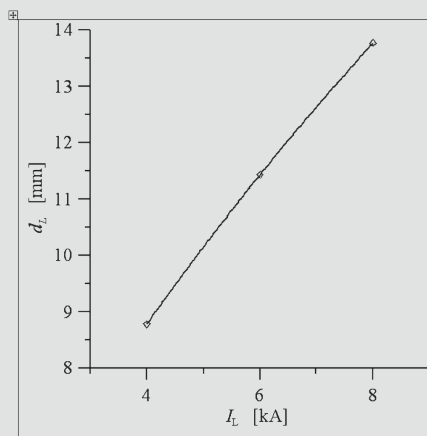
$$d_L \approx k(10p)^{-m} I_L^n \quad (5)$$

gdzie:

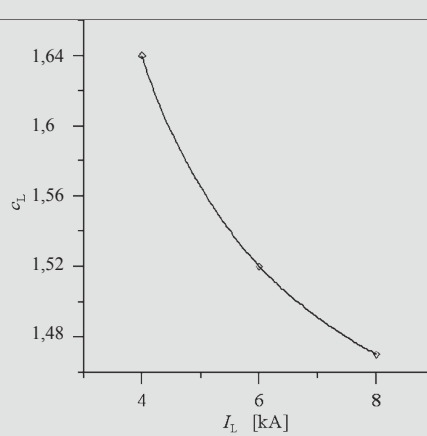
p – ciśnienie gazu, MPa; przyjęto $p = 0,1$ MPa

I_L – prąd łuku, A

$k = 0,4 \times 10^{-2}$, $m = 0,22 \div 0,27$, $n = 0,65$



Rys. 7. Zależność zastępczej średnicy łuku d_L od prądu łuku I_L



Rys. 8. Zależność współczynnika oporu aerodynamicznego c_L od prądu łuku I_L



Zależność zastępczej średnicy łuku d_L od prądu łuku przedstawiono na rys. 7.

Wykorzystując wyniki pomiarów średniej prędkości łuku oraz wyniki obliczeń zastępczej średnicy kolumny łuku, przekształcając zależność (4), przeprowadzono analizę zmian współczynnika oporu aerodynamicznego łuku c_L . Zależność współczynnika c_L od prądu łuku I_L przedstawiono na rys. 8. W obliczeniach przyjęto: $k_{FL} = 0,8$ oraz gęstość gazu $\rho_{20} = 1,18 \text{ kg/m}^3$.

5. PODSUMOWANIE

Wyniki obliczeń indukcji magnetycznej oraz sił elektrodynamicznych w warunkach łuku zwarciovego na szynach rozdzielnic osłoniętych z izolacją powietrzną umożliwiają szerszą analizę prędkości przemieszczania się łuku wzdłuż szyn w zależności od parametrów łuku i konfiguracji szyn. Wykorzystując dodatkowo wyniki pomiarów średniej prędkości łuku w układzie szyn płaskich, można obliczyć średnicę łuku oraz współczynnik charakteryzujący jego opór aerodynamiczny. Przedstawiona wyżej analiza pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Podczas trójfazowych zwarć łukowych na szynach ułożonych w jednej płaszczyźnie prędkości przemieszczania się każdego z dwóch łuków (palących się między szyną środkową a zewnętrznymi) mogą się różnić z powodu działania sił elektrodynamicznych układu trójfazowego.

2. Siły elektrodynamiczne powodują deformację i wydłużanie łuku oraz wzrost napięcia łuku. To powoduje wzrost mocy łuku i powiększa skutki zwarcia w rozdzielnicach średniego napięcia.

3. Zmniejszanie się wartości współczynnika c_L wraz ze wzrostem prądu I_L może wskazywać na malejący wpływ zjawiska cofania się łuku na wypadkową prędkość łuku. Cofanie się łuku, czyli zmiana kierunku jego przemieszczania się wzdłuż szyn, wynika z oddziaływania sił elektrodynamicznych układu trójfazowego szyn.

Dokładna analiza ruchu łuku wzdłuż szyn umożliwia lepszą ocenę skutków zwarć łukowych w rozdzielnicach i może się przyczynić do znacznego ograniczenia tych skutków, a tym samym zwiększyć niezawodność oraz bezpieczeństwo eksploatacji tych rozdzielnic.

BIBLIOGRAFIA

1. Flex PDE 5.1.2. User Guide. PDE Solution Inc. 2005.
2. Partyka R., Badanie skutków zwarć łukowych w rozdzielnicach osłoniętych, Monografie 70, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2006.
3. Ciok Z., Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych, WNT Warszawa 1982.