

Przegląd aktualnych kierunków badań w zakresie łącznikowej techniki próżniowej

Streszczenie. Niniejszy artykuł zawiera przegląd aktualnych badań z zakresu łącznikowej techniki próżniowej opublikowanych w ostatnich latach w wiodących światowych czasopismach technologiczno-badawczych. Przedstawiony w niniejszej pracy aktualny stan badań ma umożliwić wytyczenie programu badań mogącego wspomóc rozwój tej technologii poprzez zwiększenie wiedzy o zjawiskach podstawowych istotnych dla eksploatacji i dalszego rozwoju wyłączników próżniowych.

Abstract. Present publication contains review of current research in switching vacuum technology published in leading technological journals in recent years. Aim of the presented state of the art in vacuum switching technology is determining course of further research in vacuum switching technology, especially in range of fundamental research crucial for further circuit breaker development. (Review of current research trends in vacuum switching technology).

Słowa kluczowe: wyłączniki próżniowe, komory próżniowe, aktualny stan badań.

Keywords: vacuum circuit breaker, vacuum interrupter, current research state.

Wstęp

Wyłączniki próżniowe zdominowały obecnie rynek wyłączników średnich napięć (SN) i uważane są za perspektywiczną technologię również w segmencie wyłączników Wysokich Napięć (WN). Wysoka niezawodność konstrukcji komór gaszeniowych, korzystne właściwości łączeniowe próżni oraz jej ekologiczna przyjazność sprawia, że technika próżniowa obecnie dominuje w wielu segmentach rynku, w trakcie są również prace związane z dalszym rozszerzeniem zakresu jej stosowania [1].

Zalety techniki próżniowej ugruntowane na poziomie SN, przyczyniły się do rozwoju konstrukcji wysokonapięciowych oraz wyłączników generatorowych. Obecnie w Japonii eksploatowane są wyłączniki próżniowe do poziomu napięć znamionowych 204 kV [2]. Również pierwsze wysokonapięciowe wyłączniki na poziomie napięcia dystrybucyjnego 110 kV zostały zainstalowane w Polsce [3].

Niniejsza praca jest przeglądem aktualnych kierunków badań w zakresie techniki próżniowej. Wykonany przegląd badań obejmuje prace, opublikowane w wiodących czasopismach IEEE: IEEE Transactions on Plasma Science, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation oraz IEEE Transactions on Power Delivery. Zakres prac został ograniczony do lat 2016-2020. Przedstawione badania zostały opisane w siedmiu grupach tematycznych: wytrzymałość napięciowa przerwy międzystykowej, próżniowy łuk elektryczny, ruch plamki katodowej, pomiary prądu emisji elektronowej, nowe rozwiązania konstrukcyjne oparte o łączniki próżniowe, diagnostyka komór próżniowych oraz interakcja wyłącznika próżniowego z siecią. W ostatnim rozdziale zawarto wnioski sformułowane na podstawie przedstawionego przeglądu badań.

Wytrzymałość napięciowa przerwy międzystykowej

W kontekście rozwoju techniki próżniowej w kierunku wysokich napięć, szczególnie uwagą zostały objęte zjawiska zachodzące w przerwie międzystykowej. Wraz ze wzrostem odległości międzystykowej zauważa się stopniową zmianę mechanizmu inicjacji wyładowania. Przy zwiększaniu odległości międzystykowych, dla charakterystycznego przy małych odstępach ($d < 0,5$ mm), mechanizmu bazującego na emisji polowej, następuje stopniowy wzrost znaczenia mikrocząstek w inicjacji wyładowania. W przypadku odstępów międzyelektrodowych $d > 2$ mm dominującym staje się mechanizm inicjacji wyładowania przez mikrocząstki.

Badania zmiany mechanizmu wyładowania wraz ze wzrostem odległości międzystykowej zostały opisane w pracy [4]. Badania te wykonano w dedykowanym układzie stykowym, modelującym układ izolacyjny ostrze-płyta. Po wykonaniu wstępnego kondycjonowania styków, dla trzech odległości międzystykowych d : 0,5, 0,8 i 1 mm, stopniowo, z krokiem 0,5 kV/min, zwiększano przemienne napięcie probiercze narażające przerwę międzystykową. Wzrost napięcia był kontynuowany do momentu wystąpienia przeskoku. Na podstawie mierzzonego prądu emisji, elektronowej wnioskowano o rodzaju mechanizmu inicjacji wyładowania. Pomiary wykonano dla trzech komór. Dla każdej komory, wykonano dwa pomiary obserwując czy nastąpiła zmiana mechanizmu inicjacji wyładowania pomiędzy pierwszą oraz drugą próbą.

Wraz ze wzrostem odległości międzystykowej obserwowano coraz istotniejszy wpływ mikrocząstek na inicjację wyładowania. Dla $d = 0,5$ mm, wszystkie przeskoki inicjowane były prądem emisji elektronowej, natomiast dla $d = 1$ mm, dla wszystkich badanych komór zaobserwowano zmianę mechanizmu wyładowania, tj. z wyładowania inicjowanego emisją polową w pierwszej próbie, na wyładowanie inicjowane przez mikrocząstki w drugiej próbie.

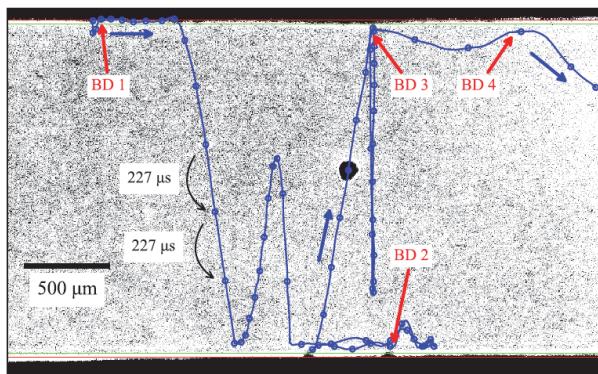
Mikrocząstki są główną przyczyną występowania późnych zapłonów ponownych, generujących w sieci znaczne przepięcia [5], [6]. Z tego względu, badany aspekt jest ruch oraz trajektoria wyzwolonych z powierzchni stykowych mikrocząsteczek, a także obserwacja inicjowanych przez nie zjawisk oraz procesów [7]. Obserwacja ruchu przedstawiona w pracy [7], bazowała na optycznej rejestracji ruchu cząstek kamerą szybką o wysokiej rozdzielczości (rys.1).

Badanie polegało na wymuszeniu prądu, najpierw stałego (DC) o stosunkowo małej wartości, a po osiągnięciu przez styki maksymalnej odległości międzystykowej ($d = 2$ mm) wymuszeniu półfali prądu przemiennego o wartości skutecznej 800-2400 A. Po naturalnym przejściu prądu przez wartość zerową, załączano część wysokonapięciową układu syntetycznego [8], obserwując ruch cząstek w przestrzeni międzystykowej, wskutek przyłożonego napięcia.

Z wykonanych 160 prób w układzie syntetycznym, w przypadku 4 testów przeskok zainicjowały wolne (ok. 1 m/s) ale duże (ok. 100 μ m średnicy) mikrocząsteczki, natomiast w przypadku 4 prób, przeskok został zainicjowany poprzez szybkie (ok. 15 m/s) ale małe cząsteczki (20-40 μ m średnicy). W obu przypadkach, przeskokowi zawsze towarzyszyła emisja światła. W przypadku większych

cząsteczek, emisja światła była obserwowana pomiędzy cząsteczką, a powierzchnią katody. W pozostałych 152 próbach wyładowania były powodowane czynnikami, których złożenie nie pozwala na jasne określenie mechanizmu inicjacji. Powodem mogła być niedostateczna rozdzielczość przestrzenna kamery oraz brak możliwości obserwacji całej przestrzeni międzystykowej.

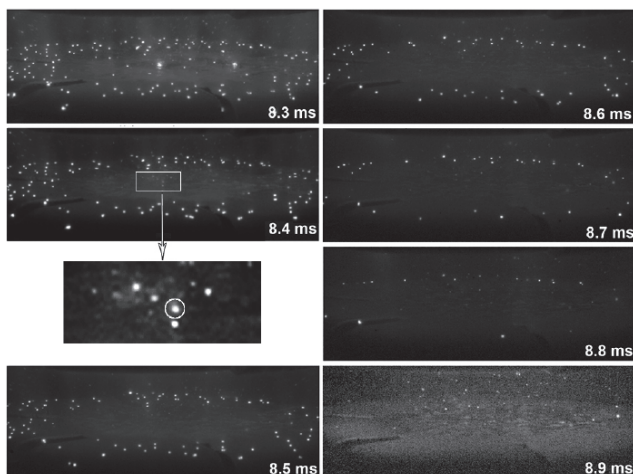
Ciekawą obserwacją podczas badań był brak znaczącej zmiany wielkości cząstek, wraz z pokonanym dystansem. Sugeruje to konieczność uwzględnienia w modelach nowego efektu, powodującego lokalne zwiększanie współczynnika wzmocnienia pola wraz ze zbliżaniem się mikrocząsteczki do powierzchni styku.



Rys.1. Zarejestrowana trajektoria ruchu cząstki w przerwie międzystykowej, wraz z oznaczonymi miejscami inicjacji kolejnych zapiónów (BDx), [7]

Próżniowy łuk elektryczny

U początku rozwoju łączeniowej techniki próżniowej, uwaga została zwrócona na obserwację zjawisk przykatodowych, a w szczególności wpływu katody na wytrzymałość napięciową łącznika. W kształtowaniu wytrzymałości napięciowej, interesująca jest analiza stanu styków po narażeniu łukowym oraz obserwacja mechanizmu emisji mikrocząstek z plamek katodowych oraz nadtopionej powierzchni katody [9]. W pracy [9] badano 3 układy stykowe AMF o średnicach: 50, 55 oraz 64 mm. Po wstępnym kondycjonowaniu, styki poddawane były narażeniu łukowemu podczas operacji otwierania. W trakcie rozchodzenia się styków, rejestrowano obraz powierzchni katody przy użyciu kamery szybkiej.



Rys.2. Powierzchnia katody w kolejnych chwilach czasu, wraz ze zbliżaniem się wyłączanego prądu do zera ($I = 0,9 I_n$), [9]

Analizując obrazy przedstawione na rysunku 2, zaobserwowano, że wraz ze zbliżaniem się wartości prądu do zera, następuje zawężenie obszaru aktywnego do

krawędzi katody. Obszar w pobliżu osi styków ulega zestaleniu (powierzchnia styków jest wygładzana poprzez napięcie powierzchniowe), a plamki katodowe pojawiają się na obrzeżu styków. Przy wzroście prądu, dochodzi do nadtopienia obszaru w pobliżu osi układu stykowego. Na wybrzuszeniach i zagłębieniach roztopionego metalu, powstają plamki katodowe, którym towarzyszą mikroeksplozje wypukłości oraz rozpylenie mikrokropelek roztopionego materiału stykowego. Przy czym emitowane kropelki, są istotnie zróżnicowane pomiędzy sobą, pod względem rozmiaru oraz prędkości poruszania się.

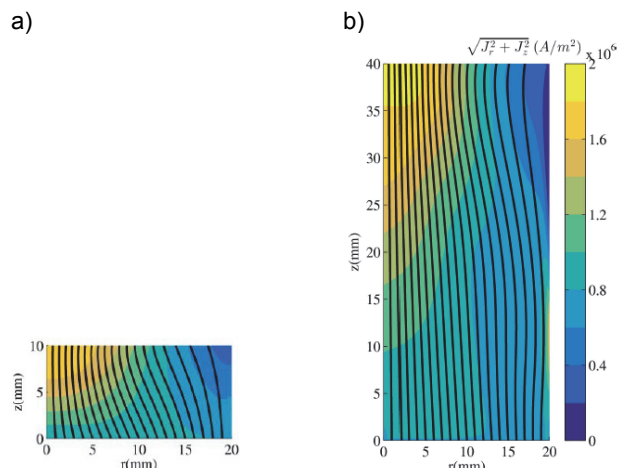
Rozkład temperatury na powierzchni katody w pobliżu zera prądu jest silnie nierównomierny, z najbardziej gorącym obszarem w pobliżu osi styku. W przypadku anody, rozkład temperatury jest bardziej równomierny. Obszar o najwyższej temperaturze tworzy pierścień wokół stosunkowo zimnego obszaru wokół osi styku.

W budowaniu się wytrzymałości napięciowej przerwy międzystykowej przy otwieraniu styków wyłącznika po zgaszeniu łuku, główną rolę odgrywają zjawiska inicjowane przez katodę. Jednak do rozwoju pełnego wyładowania łukowego, istotna jest aktywność anody. Aktywność anody jest silnie związana z powstaniem na jej powierzchni tzw. stopy anodowej. Próba opisu zjawiska występowania stopy anodowej, a w szczególności opisu wartości prądów, dla których zjawisko to występuje, została przedstawiona w pracy [10]. Układ probierczy obejmuje 4 układy stykowe, wykonane z czystych metali: wolframu, molibdenu, chromu oraz żelaza. Wykorzystano tu styki lite, z zewnętrznymi cewkami Hemholza do generacji osiowego pola magnetycznego (AMF). Próby obejmowały wyłączenie prądu o wartościach w zakresie 2-30 kA (RMS). W trakcie rozchodzenia się styków obserwowano łuk łączeniowy w przestrzeni międzystykowej. Wartość progu prądowego formacji stopy anodowej, rejestrowano na podstawie:

- obserwacji kamerą szybko powierzchnii anody,
- napięcia łuku elektrycznego,
- aktywności anody.

W wyniku badań określono progi prądowe pojawienia się stopy anodowej dla trzech różnych wartości natężenia pola AMF. Określone progi prądowe wykazują silną zależność od charakterystyki przewodzenia ciepła przez materiał stykowy.

Obserwowano również mechanizm emisji anodowej opierający się na emisji mikrocząstek oraz kropeł roztopionego materiału stykowego. Emisja materiału stykowego w postaci par, jest znacząca tylko w przypadku anody o mocno nasyconej charakterystyce ciśnienia par, będącej funkcją temperatury.



Rys.3. Rozkład wektora gęstości prądu w przestrzeni międzystykowej: a) $I_{gap} = 10$ mm; b) $I_{gap} = 40$ mm, $z = 0$ odpowiada powierzchni katody, $r = 0$ odpowiada osi symetrii styków, [11]

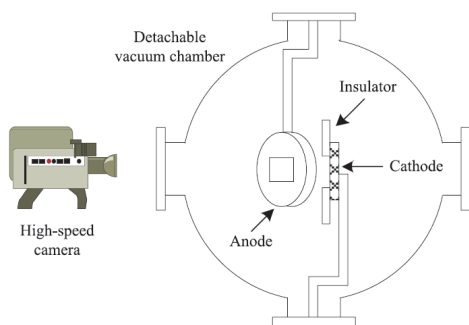
Pomiary i obserwacje umożliwiają rozwój modeli łuku elektrycznego. Zdecydowana większość modeli symulacyjnych obejmuje, stosunkowo dobrze poznany zakres odstępów międzystykowych, charakterystyczny dla komór próżniowych średnich napięć. Z punktu widzenia rozwoju wysokonapięciowej techniki próżniowej, istotne jest poznanie natury procesów łukowych zachodzących dla większych odstępów międzystykowych. W przedstawionym w pracy [11] dwuwymiarowym magnetohydrodynamicznym modelu symulacyjnym, analizie poddano wpływ dużych odstępów (10–40 mm) na skupienie próżniowego łuku elektrycznego w przestrzeni międzystykowej. Założono prąd wyłączany o wartości 1 kA oraz styki o promieniu 20 mm. W symulacjach przyjęto jednorodny, o wartości 5 mT, rozkład pola magnetycznego w przerwie międzystykowej oraz okołodźwiękowy przepływ plazmy.

Zaobserwowano [11] wzrost skupienia plazmy w pobliżu anody dla odległości międzystykowej wynoszącej $l_{gap} = 10$ mm. Dla większych odległości międzystykowych, zmiana jednorodności rozkładu plazmy w przerwie międzystykowej była znacznie mniejsza (rys. 3). Taki stan rzeczy, spowodowany jest oddziaływaniem warstwy przyanodowej na dystansie do około 15 mm, co w przypadku 10 mm odległości międzystykowej, powoduje silnie oddziaływanie już na powierzchni samej katody. Dla większych odległości (20–40 mm), wpływ warstwy przyanodowej na rozkład energii jest pomijalny, co sugeruje brak zagrożenia nadmiernym nagrzewaniem anody przy dużych odległościach międzystykowych.

Ruch plamki katodowej

Specyfika próżniowego łuku elektrycznego sprawia, że duży wpływ na przebieg procesu łukowego ma plamka katodowa, a w szczególności jej żywotność oraz ruchliwość. Sam ruch plamki jest w znacznym stopniu losowy, jednak wykazuje pewną selektywność w „wyborze” miejsca zapłonu nowej plamki np. z powodu niższej pracy wyjścia. W badaniach przedstawionych w pracy [12], obserwowano ruch plamki po powierzchni katody oraz zależność tego ruchu od odległości międzystykowej oraz grubości zalegających na powierzchni styków tlenków. Ruch plamek katodowych był obserwowany optycznie w przygotowanym do tego celu układzie probierczym (rys. 4).

Dzięki odpowiednio przygotowanej anodzie, możliwy był optyczny wgląd w powierzchnię katody, a następnie cyfrowa analiza tak uzyskanych obrazów. Chcąc uzyskać niezaburzony ruch plamek, prąd ograniczono do wartości 2 A, tak by jednocześnie paliła się tylko jedna plamka katodowa.



Rys. 4. Komora modelowa z odpowiednio przygotowanym otworem w anodzie, pozwalającym na optyczną obserwację powierzchni katody, [12]

Podczas badań obserwowano ruch plamki katodowej o dwóch prędkościach: ruch wolny, który jest ruchem dominującym w komorach próżniowych oraz ruch szybki. Ruch wolny charakterystyczny jest dla plamki katodowej w stosunkowo wąskim obszarze styków i związany jest z

przemieszczaniem się plamki po warstwach nalotowych, a zatem zależny jest od procesu kondycjonowania powierzchni stykowej. Kolejne plamki pojawiają się na obrzeżu głównego krateru poprzedniej plamki katodowej.

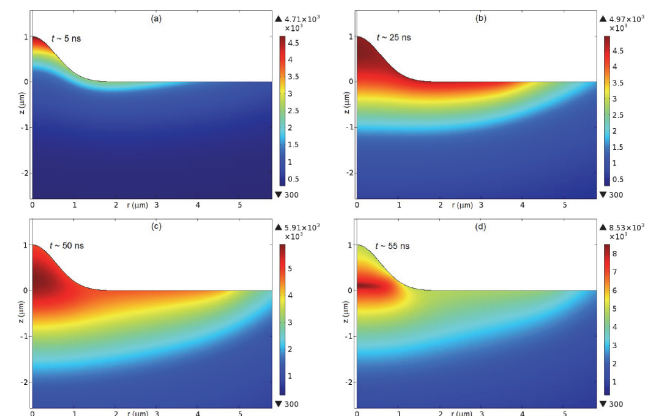
Z kolei tryb szybki związany jest z przemieszczaniem skokowym plamki po powierzchni katody W tym przypadku kolejne zapalające się plamki są umiejscowione na powierzchni styków w stosunkowo dużej odległości względem siebie.

Wraz ze spadkiem grubości warstw nalotowych lub wraz ze wzrostem odległości międzystykowych, plamki katodowe stają się co raz bardziej ruchliwe. Rośnie prawdopodobieństwo, że plamka na krócej pozostanie w danym obszarze styków.

Pomimo wysokiej przestrzennej (47 μm) oraz czasowej (2 μs) rozdzielczości zastosowanej w pracy [12] kamery szybkiej, nie osiągnięto wystarczająco dokładnej analizy ruchu plamek katodowych.

Badania pomiarowe plamek katodowych znajdują również swoje odzwierciedlenie w pracach symulacyjnych. Tworzone są coraz dokładniejsze modele symulacyjne, odwzorowujące złożone oddziaływania katoda-plazma, co umożliwia badanie procesów fizycznych zachodzących w elektrycznym łuku próżniowym. Z tego powodu ciągłej ewolucji ulegają również modele plamek katodowych, uwzględniające nowe oddziaływania. W pracy [13] przedstawiono badania wpływu pozostałości chmury plazmy po wygasłej plamce katodowej, na model plamki wykorzystujący nieliniowe nagrzewanie jej powierzchni.

Analiza interakcji plazmy oraz katody wykonywana jest w dwóch krokach. W pierwszym, przykatodowa warstwa plazmy charakteryzowana jest poprzez strumień energii oraz gęstości prądu w kierunku z plazmy do katody. Wielkości te obliczane są jako funkcje lokalnej temperatury powierzchni katody oraz przykatodowego spadku napięcia. W drugim kroku, obliczany jest rozkład temperatury oraz potencjał elektryczny na katodzie. Obliczenia wykonywane są na podstawie zależnych od czasu równań przewodzenia ciepła.



Rys. 5. Etapy życia plamki katodowej: a) końcowy etap zapłonu plamki; b) końcowy etap ekspansji plamki; c) - d) etap stygnięcia powierzchniowego prowadzący do eksplozji plamki, [13]

Poprzez badanie oddziaływania pozostałości chmury plazmy (po poprzedniej plamce katodowej), rozróżnia się następujące fazy życia plamki: zapłon, rozprzestrzenianie się łuku po powierzchni katody oraz eksplozja cieplna. Przebieg poszczególnych etapów prezentuje rysunek 5.

Fazę zapłonu charakteryzuje szybki przyrost temperatury, co następuje w wyniku bombardowania powierzchni katody przez jony pochodzące z pozostałości chmury plazmy po poprzedniej plamce. W wyniku zapłonu, temperatura powierzchni katody stabilizuje się na poziomie 4700–4800 K, dla której nagrzewanie powierzchni katody w

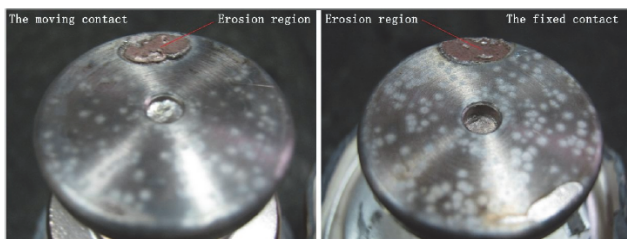
wyniku jej bombardowania jest balansowane chłodzeniem tej powierzchni w wyniku emisji elektronowej. Stwierdzono, że obszar maksymalnej temperatury przenosi się z powierzchni katody do jej wnętrza, gdzie dodatkowo wydzielane straty Joule'a powodują rozerwanie mikronierówności. Analogiczny proces może wystąpić również na płaskim fragmencie katody [13]. Proces takiego rozwoju plamki może być zatrzymany w wyniku rozproszenia chmury pozostałości plazmy, zapobiegając tym samym bombardowaniu powierzchni katody.

Pomiar prądu emisji elektronowej

Dla małych odległości międzystykowych, mechanizmem inicjującym przeskok w próżniowych układach izolacyjnych jest prąd emitowany połowo z mikronierówności katody, zwany prądem emisji elektronowej [14]. Dzięki informacjom jakie niesie ze sobą pomiar prądu emisji elektronowej na temat próżniowego układu stykowego, badania w tej tematyce ukazują się od dawna [15], [16]. Dotychczasowe badania dotyczyły analizy prądu emisji po wykonaniu przez łącznik najbardziej wymagających obciążających dla styków procesów łączeniowych, takich jak załączanie prądów rozruchowych transformatora [15] czy wyłączanie prądów w obwodach pojemnościowych [16].

Kolejnym rodzajem badań w odniesieniu do prądów emisji elektronowej jest określenie wpływu udarowego prądu baterii kondensatorów na stan styków poprzez badanie charakterystyki prądu emisji elektronowej [17]. Badania te wykonano w pracy [17] przy ocenie wpływu na prąd emisji elektronowej amplitudy prądu łączeniowego oraz liczby operacji łączeniowych. Badanymi obiektami były 4 komory próżniowe o układach stykowych CuCr25. Po wstępnym wykondycjonowaniu komór, podzielono je na dwie grupy. Komory A1 oraz A2 zostały użyte do załączenia prądu 10 kA (rms), natomiast komory B1 oraz B2 użyto do załączania prądu 20 kA (rms). Każdą z komór wykonano załączenia prądu dwukrotnie. Po wykonanych operacjach łączeniowych, dokonano pomiaru prądu emisji elektronowej przy odległości międzystykowej $d = 1 \text{ mm}$ oraz przy napięciu 30 kV o częstotliwości 50 Hz.

Uszkodzenia styków w trakcie procesów łączeniowych (rys.6) uwidaczniały się w pomiarach prądu emisji elektronowej. Przy symetrycznym napięciu sinusoidalnym, rejestrowano niesymetryczny prąd emisji elektronowej.

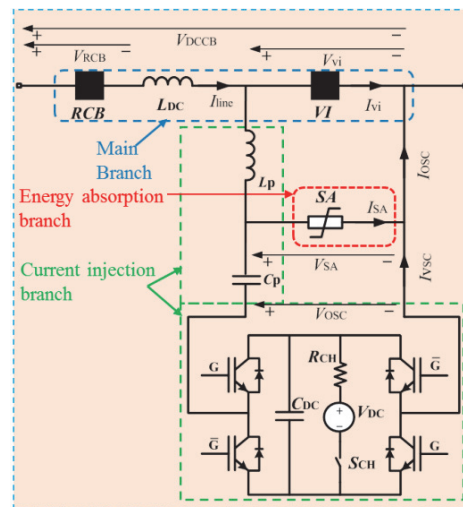


Rys.6. Powierzchnia styków po dwukrotnym załączeniu prądu pojemnościowego o wartości 20 kA, [17]

Nowe rozwiązania konstrukcyjne oparte o łączniki próżniowe

Rozwój energetyki rozproszonej i sieci oczkowych prądu stałego oznacza potrzebę rozwoju technologii łączenia prądu DC. Jest obecnie publikowanych wiele prac w tym obszarze, które mają na celu zaproponowanie nowych wyłączników hybrydowych prądu stałego opartych na komponentach energoelektronicznych oraz łącznikach mechanicznych. W pracy [18] zaprezentowano wyłącznik prądu DC opartego na wyłączniku próżniowym z układem przeciwprądu zbudowanego w oparciu o rezonansowe źródło napięciowe VARC (ang. voltage source resonant current) [18]. Opracowany wyłącznik o parametrach 24 kV DC oraz 10 kA prądu wyłączanego bazuje na komorze

próżniowej (VI) z szybkim napędem elektrodynamicznym oraz na przekształtniku napięciowym będącym źródłem energii dla rezonansowego obwodu gaszeniowego. Schemat elektryczny układu przedstawia rysunek 7.



Rys.7. Schemat elektryczny wyłącznika hybrydowego wykorzystującego układ rezonansowy ze źródłem sterowanym VARC: L_{DC} – dławik ograniczający prąd zakłóceńowy; VI – próżniowa komora gaszeniowa; RCB – wyłącznik odcinający od sieci; L_p, C_p – elementy obwodu rezonansowego wstrzykiwania prądu; $C_{DC}, R_{CH}, V_{DC}, S_{CH}$ – elementy ładowania obwodu rezonansowego, [18]

Po detekcji zakłócenia podawany jest sygnał do rozejścia się styków komory próżniowej VI. Krótko przed chwilą, w której styki osiągną wystarczająco dużą odległość międzystykową by zapewnić wytrzymałość napięciową dla budującego się na stykach komory napięcie, aktywowany jest obwód rezonansowy sterowanego źródła napięciowego w układzie równoległym do gałęzi wyłącznika. Obwód rezonansowy jest ładowany w taki sposób, że prąd w gałęzi równoległej I_{osc} wymuszony jest z coraz wyższą amplitudą i o przeciwnym kierunku w stosunku do prądu łączeniowego I_{line} w obwodzie głównym wyłącznika. Obwód rezonansowy sterowany jest do chwili zrównania się wartości chwilowych prądów w gałęzi głównej wyłącznika i w gałęzi obwodu rezonansowego ($I_{VI} = 0$), a tym samym wymuszenia przejścia prądu przez zero, co umożliwi wyłączenie prądu w torze głównym. Po wyłączeniu, budujące się napięcie powrotne na stykach wyłącznika próżniowego jest ograniczane przez równoległy do komory próżniowej warystor. Na koniec otwierany jest łącznik RCB, którego funkcją jest odizolowanie układu od sieci zasilającej.

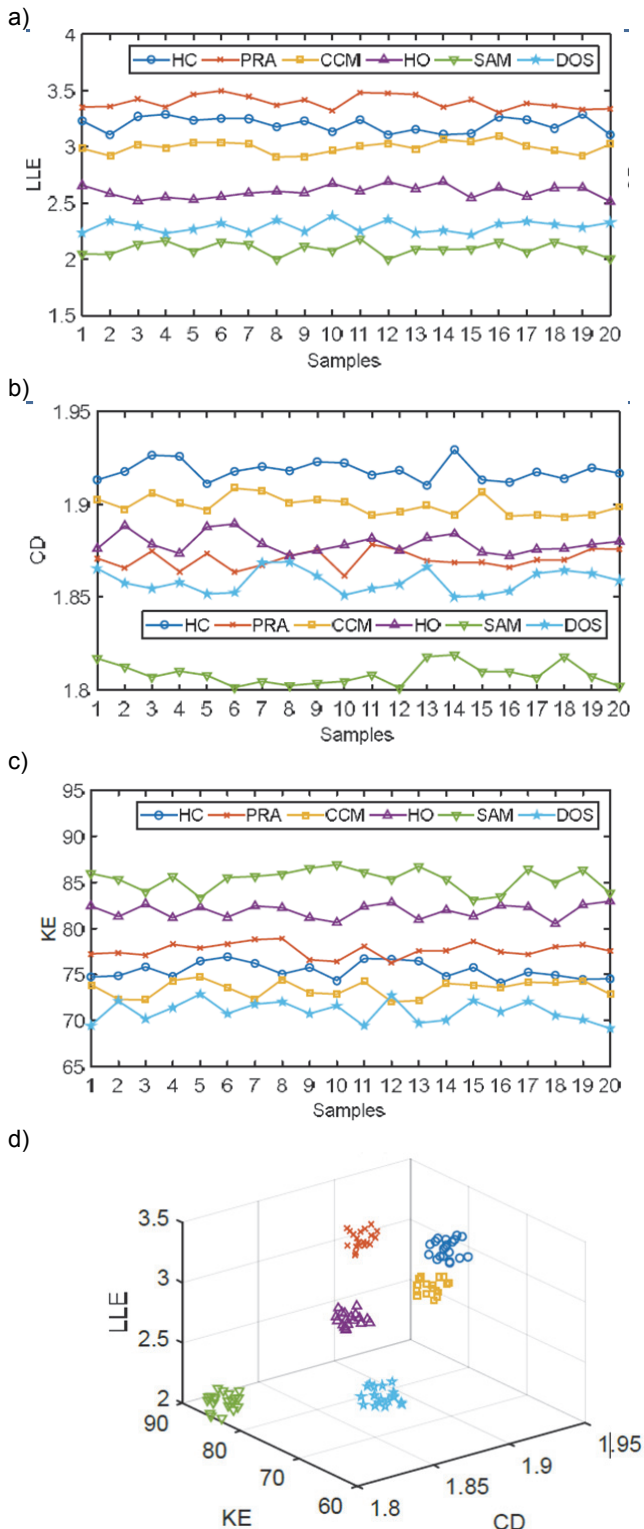
W pracy [18] zaprezentowano model symulacyjny omawianego wyłącznika (w oprogramowaniu PSCAD) wraz z fizycznym wyłącznikiem, który został poddany próbom łączeniowym.

Diagnostyka komór próżniowych

Wyłączniki próżniowe pracujące w sieciach SN są konstrukcjami niezawodnymi o długim czasie życia [19]. Obecnie znaczna część tych wyłączników osiąga granicę projektowanego czasu eksploatacji. Stanowi to motywację dla rozwoju nowych metod diagnostyki stanu próżni w komorach próżniowych. Zastosowanie znajdują tu szczególnie nowe metody sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego oraz silnie obecne rozwijane metody prognozowania stanu urządzeń (ang. predictive maintenance).

Jedną z nowych metod, w kontekście techniki próżniowej, jest wykorzystanie zjawiska wyładowań niezupełnych [20]. W pracy [20] zastosowano układ z zaprojektowaną na potrzeby eksperymentu próżniową komorą gaszeniową wyposażoną w regulację ciśnienia. W

układzie tym odtworzono zjawisko przenikania cząsteczek gazów elektroizolacyjnych do wnętrza komory gaszeniowej. Badania wykonano dla różnych poziomów podciśnienia w komorze. W tym celu do wnętrza komory wprowadzono gaz elektroizolacyjny (azot lub SF₆), a następnie, przy pomocy pompy próżniowej, ustabilizowano ciśnienie wewnątrz komory na określonym poziomie, z zakresu 0,2-100 Pa. Wadą tej metody diagnostycznej jest aplikowalny zakres ciśnień, występujący przy znacznie rozszczelnionych komorach.



Rys.8. Zestawienie klasyfikacji stanów pracy wyłącznika: a) wartości LLE; b) wartości CD; c) wartości KE; d) zestawienie stanów pracy wyłącznika w przestrzeni trzech wykorzystanych deskryptorów numerycznych, [21]

Obecnie obserwowany dynamiczny rozwój metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego, wspiera wprowadzanie metod oraz systemów diagnostycznych. Zastosowanie dedykowanego rozwiązania umożliwi diagnostykę on-line oraz prognozykę stanu wyłącznika, celem przewidywania momentu wystąpienia awarii. Istotnym elementem mającym wpływ na niezawodność wyłącznika, jest napęd. Wnioskowanie o stanie napędu możliwe na pomiarze charakterystyk wibracyjnych wyłącznika w czasie operacji łączeniowych [21]. W pracy [21] przedstawiono układ probierczy, w którym na module napędowym wyłącznika zamontowano akcelerometr, służący do pomiaru charakterystyk wibracyjnych podczas każdej operacji łączeniowej aparatu. W trakcie badań, tworzono sygnatury służące identyfikacji typowych usterek mechanizmu napędowego dla wybranych operacji łączenia-wych. Zarejestrowane charakterystyki wibracyjne wstępnie odsumowano, a następnie opisywano deskryptorami numerycznymi takimi jak: CD – Correlation Dimension, LLE – Largest Lyapunov Exponent czy KE – Kolmogorov Entropy. Dla znanych różnych typów uszkodzeń, porównywano wartości deskryptorów, sprawdzając możliwość wnioskowania na ich podstawie o typie uszkodzenia. Analizowano następujące przypadki pracy wyłącznika:

- HC – poprawne zamknięcie
- PRA – anormalna praca ciągną napędowego
- CCM – niewłaściwa praca wyzwalacza zamykającego
- HO – poprawne otwarcie
- SAM – uszkodzenie amortyzatora
- DOS – odkształcenie wału napędowego

Powyższa metoda analizy sygnałów zastosowana do identyfikacji uszkodzeń, pozwala na uzyskanie jednoznacznego rozgraniczenia pomiędzy stanem sprawności wyłącznika, a poszczególnymi uszkodzeniami wyłącznika (rys.8).

Diagnostyka wyłącznika próżniowego realizowana jest również poprzez pomiar sił działających na styki komory [22]. Rejestracja sił wykonywana jest przy użyciu sensorów bazujących na tensometrach. Sensory te instalowane są [22] w torze ciągną napędowego bieguna, tuż przy sprężynie dociskowej, co pozwala na wykonanie pomiaru działających na styki sił. W pracy [22] rejestracji podlegały również prądy wyzwalaczy oraz przemieszczenia styków w poszczególnych biegunach wyłącznika. Na podstawie kompletu pomierzonych sygnałów oraz przy wykorzystaniu narzędzi matematycznych takich jak analiza falkowa, charakteryzowano stan techniczny najważniejszych komponentów wyłącznika, wnioskując o stanie zasobnika energii, układu tłumienia czy prędkości styków.

Interakcja wyłącznika próżniowego z siecią

Oddziaływanie wyłączników z siecią modelowane jest poprzez odwzorowanie zapłonów wczesnych i późnych występujących przy otwieraniu i zamykaniu wyłącznika, a obliczenia wykonuje się w modelu symulacyjnym sieci. W pracy [23] przedstawiono model wyłącznika opracowany na podstawie próbach łączeniowych oraz pomiarach w fizycznych układach laboratoryjnych. Tak stworzony model uwzględnia nieliniowy przyrost wytrzymałości napięciowej przerwy międzystykowej, związany z nieliniowym ruchem styków wyłącznika, zdolność wyłącznika do wyłączania prądów o wysokiej częstotliwości powiązanych ze zjawiskiem zapłonów ponownych oraz zjawisko zrywania prądu. W modelu pominięto stochastyczną naturę zjawisk związanych z wyłączaniem prądu przez wyłącznik.

Pomiary, na bazie których opracowano model wyłącznika, pozwoliły na uwzględnienie w nim nieliniowego przemieszczenia styków. Tak zaktualizowany model został wykorzystany do analizy oddziaływania łącznika z siecią

podczas procesów łączeniowych. Przedstawiony model pozwala w szczególności na analizę zapłonów ponownych, szczególnie w sieciach wrażliwych na występowanie przepięć, takich jak sieci, w których występują jednostki generacji rozproszonej [24].

Podsumowanie

Obecnie technologia próżniowa wkracza w obszar napięć wysokich, jednak kontynuowane są badania zjawisk podstawowych w małoskalowych układach próżniowych komór średnich napięć. Technologia próżniowa z powodzeniem stosowana jest również w innych obszarach, takich jak wyłączniki generatorowe czy łączniki hybrydowe energoelektroniczne.

Od początków łączeniowej techniki próżniowej zagadnienia związane z wyładowaniem w próżni były w centrum zainteresowań, o czym świadczy znaczna w ostatnich latach roczna liczba publikacji w tej tematyce [25]. Obecnie, istotny jest również aspekt rozwoju wiedzy o budowaniu wytrzymałości napięciowej przerwy międzystykowej oraz o wpływie na ten proces ruchu mikrocząstek. Badany jest przebieg procesu łukowego przy wyłączaniu prądu, w szczególności dla większych odległości międzystykowych. W badaniach procesów łukowych uwzględnienia się zachowanie plamki katodowej oraz aktywność anody.

Prowadzone aktualnie badania oparte są na metodach szybkiej rejestracji optycznej. Technika ta pozwala na obserwowanie przebiegu procesów fizycznych w przestrzeni międzystykowej. W poznaniu zjawisk w komorach próżniowych barierą staje się przestrzenna oraz czasowa rozdzielczość rejestracji obecnie dostępnych na rynku urządzeń pomiarowych.

Ze względu na eksploatację coraz większej populacji komór próżniowych na granicy ich projektowanego czasu życia oraz ze względu na rozwój techniki próżniowej w zakresie wysokich napięć, istotnym nurtem badań jest rozwój metod diagnostyki i prognozy stanu wyłączników próżniowych. Pomimo znacznej liczby technik diagnostycznych stanu próżni w komorze [26], nie są obecnie stosowane techniki cechujące się łatwością stosowania w warunkach eksploatacyjnych oraz dostatecznie wysoką czułością pomiaru. Opublikowane dotychczas prace (np. [21]) wskazują na możliwość zastosowania analizy charakterystyk wibracyjnych dla diagnostyki i prognozy stanu napędów wyłączników. Prace te prowadzone są z zastosowaniem nowoczesnych metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego.

Mając na uwadze coraz bardziej kompaktowe wymiary komór próżniowych dla danych zdolności łączeniowych [27], postęp obserwowany jest również w odniesieniu do stosowania technologii próżniowej w zakresie wysokich napięć [2,4,28-31]. Związane z tym wymagania zapewnienia zewnętrznej wytrzymałości napięciowej komory, wymuszają stosowanie zewnętrznej izolacji eliminującej ryzyko wyładowań ślizgowych po zewnętrznej powierzchni obudowy. Wymagania w zakresie ekologii produktów elektroenergetyki stanowią w tym aspekcie motywację dla rozwoju nowych mediów izolacyjnych, konkurencyjnych wobec gazu SF₆.

Zdaniem autorów największy wpływ na rozwój technologii próżniowej będą miały badania w zakresie próżniowego łuku elektrycznego, pozwalające na znaczne zmniejszenie gabarytów próżniowych komór gaszeniowych, a także zastosowanie tej technologii w zakresie wysokich napięć. Narzędzia szybkiej optycznej rejestracji cyfrowej pozwalają obecnie na obserwowanie z dużą dokładnością zjawisk towarzyszących fazie łukowej oraz połukowej wyłączenia prądu elektrycznego. W szczególności

obserwacja fazy połukowej, przynosi wiele wyjaśnień na temat rozwoju zapłonu.

Za perspektywiczne można również uznać badania zjawisk zachodzących w komorze dla dużych odległości międzystykowych tzn. badania nad zachowaniem kolumny łukowej, ruchem plamki katodowej czy mechanizmem inicjacji zapłonu. Istotny jest rozwój metod diagnostyki i predykcji stanu komory czy wyłącznika, szczególnie z zastosowaniem systemów pracujących w trybie on-line oraz z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji czy uczenia maszynowego w powiązaniu z podejściem big data.

Autorzy: mgr inż. Szymon Stoczko, dr hab. inż. Marcin Szewczyk, prof. PW, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa, E-mail: szymon.stoczko.dokt@pw.edu.pl; marcin.szewczyk@ien.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Yao X. *et al.*, Development and Type Test of a Single-Break 126-kV/40-kA–2500-A Vacuum Circuit Breaker, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 1, 2016.
- [2] CIGRE, Paper 589: The Impact of the Application of Vacuum Switchgear at Transmission Voltages, 2014.
- [3] Lechman M., and Mański P., Doświadczenia i uruchomienia i eksploatacji wyłącznika próżniowego na napięcie 110 kv, *Urządzenia dla Energ.*, no. 2, pp. 49–55, 2018.
- [4] Li S., Geng Y., Liu Z., and J. Wang, A breakdown mechanism transition with increasing vacuum gaps, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 6, pp. 3340–3346, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006482.
- [5] Chmielewski T., Oramus P., Szewczyk M., Kuczek T., and Piasecki W., Circuit breaker models for simulations of short-circuit current breaking and slow-front overvoltages in HV systems, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 174–181, 2017.
- [6] Szewczyk M., Kuczek T., Oramus P., Piasecki W., Modeling of repetitive ignitions in switching devices: case studies on Vacuum Circuit Breaker and GIS disconnector, in *Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems*, 2015.
- [7] Ejiri H. *et al.*, Late Breakdowns Caused by Microparticles after Vacuum Arc Interruption, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 47, no. 8, pp. 3392–3399, 2019, doi: 10.1109/TPS.2019.2917379.
- [8] Szewczyk M., Stoczko S., Chmielak W., and Zagrajek A., Comparative Study of Synthetic Test Circuits for Testing of MV and HV AC Circuit Breakers According to IEC Std. 62271, in *Conference on Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE 2019)*, 2019.
- [9] Logachev A. A., Poluyanov I. N., Zabello K. K., Barinov Y. A., and Shkol'nik S. M., Cathode Surface State and Cathode Temperature Distribution after Current Zero of Different AMF-Contacts, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 47, no. 8, pp. 3516–3524, 2019, doi: 10.1109/TPS.2019.2923326.
- [10] Zhang Z. *et al.*, Anode Spot Threshold Current of Four Pure Metals Subjected to Uniform Axial Magnetic Field in High Current Vacuum Arcs, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 8, pp. 2135–2143, 2017, doi: 10.1109/TPS.2017.2705171.
- [11] Tezenas du Montcel A., Chapelle P., Creusot C., Jardy A., Numerical Study of the Current Constriction in a Vacuum Arc at Large Contact Gap, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol 47, no. 5, 2019, doi: 10.1109/TPS.2019.
- [12] Li W., Shi Z., Wang C., Shi F., Jia S., and Wang L., The Motion Characteristics of a Single Cathode Spot in Removing Oxide Layer on Metal Surface by Vacuum Arc, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 1, pp. 106–112, 2017, doi: 10.1109/TPS.2016.2636189.
- [13] Cuhna M. D., Kaufmann H. T. C., Benilov M. S., Hartmann W., Wenzel N., Detailed Numerical Simulation of Cathode Spots in Vacuum Arcs – I, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol 45, no. 8, 2017, doi: 10.1109/TPS.2017.2697005.
- [14] Schwoebel P. R. and Brodie I., Surface-science aspects of vacuum microelectronics, *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. Process. Meas. Phenom.* 13, 1995.
- [15] Smeets R. P. P., Kuivenhoven S., Chakraborty S., and Sandolache G., Field electron emission current in vacuum

- interrupters after large inrush current, *Proc. - Int. Symp. Discharges Electr. Insul. Vacuum, ISDEIV*, pp. 157–160, 2012, doi: 10.1109/DEIV.2012.6412476.
- [16] Zadeh M. K., Hinrichsen V., Smeets R., and Lawall A., Field emission currents in vacuum breakers after capacitive switching, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 3, pp. 910–917, 2011, doi: 10.1109/TDEI.2011.5931080.
- [17] Yu Y., Wang J., Yang H., Geng Y., and Liu Z., Asymmetrical AC field emission current characteristics of vacuum interrupters subjected to inrush current, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 1, pp. 49–57, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005258.
- [18] Liu S. *et al.*, Modelling, Experimental Validation and Application of VARC HVDC Circuit Breakers, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8977, no. c, pp. 1–1, 2019, doi: 10.1109/tpwr.2019.2947544.
- [19] Renz R., Gentsch D., Fink H., Slade P. G., and Schlug M., Vacuum Interrupters - sealed for life, in *19th International Conference on Electricity Distribution*, 2007.
- [20] Nakano Y., Kozako M., Hikita M., Tanaka T., and Kobayashi M., Estimation method of degraded vacuum in vacuum interrupter based on partial discharge measurement, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 5, pp. 1520–1526, 2019, doi: 10.1109/TDEI.2019.008142.
- [21] Yang Q., Ruan J., Zhuang Z., and Huang D., Chaotic Analysis and Feature Extraction of Vibration Signals from Power Circuit Breakers, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8977, no. c, 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2934123.
- [22] Tang J., Lu S., Xie J., and Cheng Z., Contact Force Monitoring and Its Application in Vacuum Circuit Breakers, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 5, pp. 2154–2161, 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2423686.
- [23] Abdulahovic T., Thiringer T., Reza M., and Breder H., Vacuum Circuit-Breaker Parameter Calculation and Modelling for Power System Transient Studies, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 3, pp. 1165–1172, 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2357993.
- [24] Piasecki W., Kuczek T., Florkowski M., Transformer Switching With Vacuum Circuit Breaker: Case Study of PV Inverter LC Filters Impact on Transient Overvoltages, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 1, 2016.
- [25] Boxman R. L., Goldsmith S., Greenwood A., Twenty-Five Years of Progress in Vacuum Arc Research and Utilization, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 25, no. 6, 1997.
- [26] Chmielak W., Przegląd metod diagnozowania stanu próżni wyłączników próżniowych, *Przegląd Elektrotechniczny* R. 90, nr 2, 2014.
- [27] Slade P. G., Hammer, C., Growth of Vacuum Interrupter Application in Distribution Switchgear, *Trends in Distribution Switchgear* 10-12.11.1998, no 459, 1998.
- [28] Siemens, Ulotka: 3AV1 blue circuit breakers.
- [29] Falkingham L. T., Cheng K. W., Molan W. J., The design of the 245 kV, Vacuum Circuit Breaker, *XXVIIth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Suzhou, 2016.
- [30] Liu Z., Wang J., Xiu S., Wang Z., Yuan S., Zhou H., Yang R., Development of High-Voltage Vacuum Circuit Breakers in China, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 35, no. 4, 2007, doi: 10.1109/TPS.2007.896929.
- [31] Homma M., Sakaki M., Kaneko E., Yanabu S., History of Vacuum Circuit Breakers and Recent Developments in Japan, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, no. 1, 2006.