

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej



mgr inż. Tomasz Kuczek

**Operacje łączeniowe wyłącznikiem próżniowym w sieciach średniego
napięcia z uwzględnieniem paneli fotowoltaicznych**

*Vacuum circuit breaker switching in medium voltage networks
with photovoltaic panels*

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Promotor:

Dr hab. inż. Marek Florkowski

Kraków, 2015

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE.....	3
2. MECHANIZM POWSTAWANIA PRZEPIĘĆ PRZY DZIAŁANIU WYŁĄCZNIKÓW PRÓŻNIOWYCH.....	5
3. PRZEPIĘCIA SZYBKOSMIENNE W WARUNKACH ROZRUCHU I WYŁĄCZANIA ELEKTROWNI FOTOWOLTAICZNEJ	6
3.1 Rozruch elektrowni fotowoltaicznej	7
3.2 Planowane wyłączanie elektrowni fotowoltaicznej	7
4. ANALIZA PRZEPIĘĆ SZYBKOSMIENNYCH.....	8
4.1 Badania eksperymentalne	10
4.2 Symulacje stanów przejściowych	13
4.3 Sposoby tłumienia przepięć – wnioski i rekomendacje	16
5. PODSUMOWANIE.....	17
6. WYBRANA LITERATURA.....	19

1. WPROWADZENIE

Bezpośrednie przetwarzanie promieniowania słonecznego w energię elektryczną za pośrednictwem paneli fotowoltaicznych – to jeden z dynamicznie rozwijających się kierunków dywersyfikacji źródeł energii elektrycznej, jakim jest energia odnawialna. Prognozy wskazują, iż w najbliższej perspektywie, około 2020 roku, całkowita moc instalacji fotowoltaicznych będzie pokrywać około 20% rynku źródeł energii odnawialnej. Dotyczy to zarówno małych instalacji przydomowych jak również dużych elektrowni fotowoltaicznych o maksymalnej generowanej mocy większej niż 500 kW_p [6, 12]. Oznacza to rozwój systemów konwersji energii w elektrowniach solarnych, ale równocześnie potrzebę rozwiązania szeregu problemów dotyczących zarówno etapu produkcji ogniw fotowoltaicznych, udoskonalania ich konstrukcji, jak i etapu współpracy elektrowni z siecią elektryczną.

Fotowoltaika, bowiem, będąc jedną z najbardziej innowacyjnych technologii, odniesiona bezpośrednio do warunków współpracy z systemem elektroenergetycznym, generuje nowe problemy badawcze, dotyczące z jednej strony optymalnych warunków tej współpracy, z drugiej – eliminowania ewentualnych zagrożeń niezawodności przesyłu energii elektrycznej spowodowanych przez zjawiska przepięciowe w stanach nieustalonych.

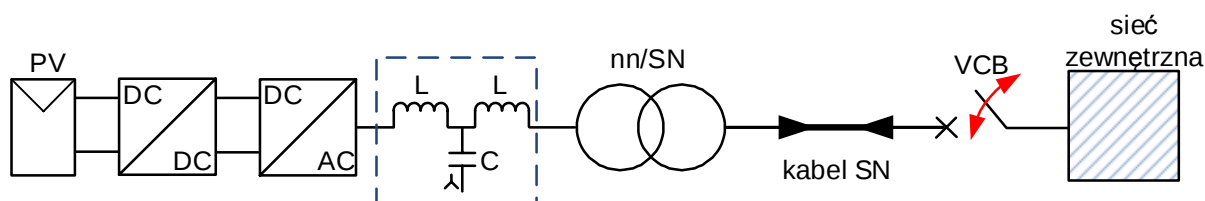
Niniejsza praca doktorska wpisuje się do drugiej grupy problemów, wskazując na zjawiska fizyczne mogące wystąpić w procedurze przyłączania / wyłączenia elektrowni fotowoltaicznej do / z sieci elektrycznej i wynikające stąd uwarunkowania techniczne dla obiektów uczestniczących w tej procedurze. Są to w szczególności zjawiska w wyłącznikach próżniowych i efekty ich oddziaływania na układy izolacyjne transformatorów i urządzeń elektroenergetycznych, systemy energoelektroniczne oraz układy sterujące.

Teza pracy doktorskiej została sformułowana następująco:

Istnieje możliwość określenia warunków eksploatacyjnych oraz topologii elektrowni fotowoltaicznych przyłączonych do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej, w których operacje łączeniowe dokonywane wyłącznikiem próżniowym w rozdzielni średniego napięcia mogą doprowadzić do generacji ponownych zapłonów łuku oraz wysokich wartości przepięć. Uwzględnienie aparatury zainstalowanej po stronie niskiego napięcia transformatora sprzęgającego z siecią dystrybucyjną jest kluczowe z punktu widzenia poprawnej analizy przepięciowej.

Thesis: It is possible to determine operating conditions and topologies of large photovoltaic grid connected power plants, where switching of vacuum circuit breaker in medium voltage switchgear may result in generation of multiple arc re-ignitions and high overvoltage peak values. Inclusion of electrical apparatus installed at operated transformer low voltage side is critical from the point of view of proper overvoltage analysis.

Ogniwa fotowoltaiczne wytwarzają moc, która jest zależna od nasłonecznienia oraz temperatury otoczenia. Generowane napięcie oraz prąd stały (DC) są przetwarzane za pomocą przekształtników DC/DC oraz DC/AC, które zapewniają odpowiedni poziom sterowania generowaną mocą. Przekształtnik DC/DC umożliwia sterowanie poziomem napięcia stałego tak, aby odpowiednia moc została przesłana do sieci zewnętrznej. Z kolei przekształtnik DC/AC (falownik) wraz z filtrami LC wykorzystywany jest, aby otrzymać napięcie sinusoidalne o częstotliwości sieciowej. Filtry LC są ważnym elementem układu, gdyż zapewniają odpowiednią filtrację tętnień prądu i napięcia na wyjściu falownika. Ponadto ograniczają zawartość wyższych harmonicznych. Wartości ich pojemności oraz indukcyjności zależą od takich parametrów, jak: prąd znamionowy, napięcie, częstotliwość przełączania tranzystorów w falowniku oraz dozwolone limity tętnień i zawartości harmonicznych THD – z ang. *Total Harmonic Distortion* (przykładowo 5%). Napięcie oraz prąd po stronie AC falownika są przetransformowane za pomocą transformatora $\dot{S}_N/n_n$ na stronę średniego napięcia, gdzie znajduje się przyłączy do sieci dystrybucyjnej. Rozdzielnia średniego napięcia, do której jest przyłączona elektrownia fotowoltaiczna jest zazwyczaj wyposażona w wyłącznik próżniowy. Schemat sieci badanej w tej pracy obrazuje Rysunek 1[1].



Rysunek 1. Schemat ideowy elektrowni fotowoltaicznej przyłączonej do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej, PV – panele fotowoltaiczne, nn – niskie napięcie, SN – średnie napięcie, VCB – wyłącznik próżniowy (z ang. vacuum circuit breaker)

Przegląd literaturowy związany z przepięciami przy wyłączaniu obciążonych i nieobciążonych transformatorów, a także dławików przedstawiono w pracy [np. 5, 10, 13]. W roku 2014 Grupa Robocza CIGRE (JWG A2/C4.39) opublikowała dwuczęściowy dokument, który kompleksowo opisuje badania tych zjawisk [3, 4]. Dotychczas nie badano jednak przepięć związanych z operacjami łączeniowymi wyłącznikiem próżniowym przy elektrowniach fotowoltaicznych. Ponadto, nie badano wpływu filtrów LC falowników solarnych na przepięcia szybkozmiennie generowane poprzez wyłącznik próżniowy. Istotnym czynnikiem wpływającym na wynik analizy jest topologia badanej sieci. Przez topologię należy rozumieć rodzaj podłączonych aparatów i urządzeń, długość oraz rodzaje kabli po stronie sieci średniego napięcia, a także parametry wyłączanych transformatorów. Podczas analizy z udziałem elektrowni fotowoltaicznej, kluczowym jest uwzględnienie aparatury zainstalowanej po stronie sieci niskiego napięcia, ze szczególnym uwzględnieniem filtrów LC falowników solarnych. Podczas wyłączeń awaryjnych, np. w przypadku wystąpienia zwarcia, należy również zwrócić uwagę na instrukcję eksploatacji sieci (*grid codes* [2]), która reguluje dopuszczalne czasy wyłączeń elektrowni. W pracy przeanalizowano wybrane stany awaryjne

oraz zaprezentowano odpowiednie sekwencje łążeń celem zniwelowania zagrożenia występowania niebezpiecznych przebiegów.

W toku realizacji pracy, w celu potwierdzenia tezy, wykonano badania laboratoryjne oraz symulacje numeryczne stanów przejściowych z wykorzystaniem opracowanego modelu przyłączania elektrowni fotowoltaicznej do sieci dystrybucyjnej, zaimplementowanego w programach komputerowych EMTP-ATP (Electromagnetic Transients Program – Alternative Transients Program) oraz PSCAD (Power Systems Computer Aided Design). Wyniki symulacji porównano z wynikami badań eksperymentalnych wykonanych w różnych konfiguracjach układu.

2. MECHANIZM POWSTAWANIA PRZEBIEGÓW PRZY DZIAŁANIU WYŁĄCZNIKÓW PRÓŻNIOWYCH

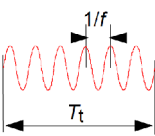
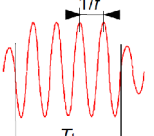
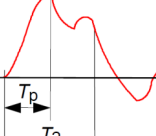
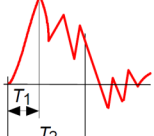
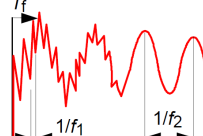
Transformator ŚN/nn, za pośrednictwem którego elektrownia fotowoltaiczna jest przyłączana do sieci dystrybucyjnej, znajduje się w procedurach łączeniowych wykonywanych za pomocą wyłącznika próżniowego. Wyłącznik ten ma zapewnić skuteczne wyłączanie prądów roboczych oraz zwarciovych. Wykorzystuje on próżnię jako medium izolacyjne oraz gaszące łuk elektryczny. Szczególną zaletą tego rozwiązania jest fakt, iż próżnia posiada około 10-krotnie większą wytrzymałość dielektryczną niż powietrze pod ciśnieniem atmosferycznym. Dzięki temu wymiary komory próżniowej mogą być znacząco zmniejszone. Wyłączniki próżniowe charakteryzuje szybki wzrost wytrzymałości elektrycznej, zdolność do wyłączania prądów wysokiej częstotliwości, ale również skłonność do ucinania prądu przed naturalnym przejściem przez zero (*chopping current*). Prąd taki jest generowany w pętli tworzonej przez układ zasilający i urządzenie wyłączane, jako efekt łuku elektrycznego w wyłączniku. Przy pewnych topologiach sieci oraz poziomach obciążenia transformatora, zjawisko to może doprowadzić do generacji ponownych zapłonów łuku elektrycznego, a co za tym idzie – przebiegów charakteryzujących się dużą wartością maksymalną i stromością. Zjawisko to jest niebezpieczne dla pracujących urządzeń oraz transformatorów – może przyspieszyć procesy starzeniowe izolacji, a w krytycznych przypadkach – doprowadzić do trwałego jej uszkodzenia [14]. Ponowne zapłony łuku elektrycznego mogą wystąpić po czasie wynikającym z parametrów układu (mikro/milisekundy) i są efektem interakcji między szybkością narastania napięcia powrotnego, a odbudową wytrzymałości dielektrycznej przerwy międzyelektrodowej, w której występują m.in. mikrocząstki pochodzące z termicznego i elektrodynamicznego oddziaływania łuku na powierzchnie elektrod. Przebiegi charakterystyczne dla operacji łączeniowych mają postać stromych przebiegów udarowych o częstotliwościach w zakresie do MHz, zawierających dodatkowo składową oscylacyjną wysokiej częstotliwości.

W Tabeli 1 podano klasyfikację przebiegów, jakie mogą wystąpić w układach elektroenergetycznych (na podstawie normy IEC 60071-1 „Koordynacja izolacji” [17]). Przebiegi zostały zgrupowane pod kątem typowych częstotliwości oscylacji oraz czasów

narastania czoła. Zaprezentowano również reprezentatywny kształt przebiegu napięcia dla każdej grupy przebiegów.

Według wyżej wymienionej normy, przebiegi generowane podczas operacji łączeniowych dokonywanych wyłącznikiem próżniowym można zaklasyfikować do grupy wysokoczęstotliwościowych przebiegów. Znajdują się one zatem w grupie o szczególnym znaczeniu z punktu widzenia koordynacji izolacji oraz narażeń przebiegiowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych.

Tabela 1. Klasyfikacja przebiegów w systemach elektroenergetycznych IEC 60071-1

Rodzaj przebieg	Niskoczęstotliwościowe		Wysokoczęstotliwościowe		
Parametry	Przebiegi ciągłe	Przebiegi dorywcze	Przebiegi wolnozmiennne Wolne czoło	Przebiegi szybkozmiennne Szybkie czoło	Przebiegi o bardzo dużej częstotliwości
Kształt przebiegu					
Zakres częstotliwości	$f = 50 \text{ Hz}$ or 60 Hz $T_t > 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0.1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$

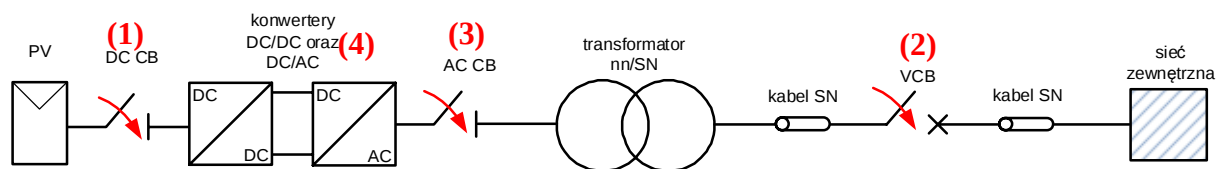
3. PRZEBIEGI Szybkozmiennne w Warunkach ROZRUCHU I WYŁĄCZANIA FOTOWOLTAICZNEJ

Stany przejściowe w elektrowniach fotowoltaicznych występują podczas operacji łączeniowych dokonywanych wyłącznikiem próżniowym, przy czym operacje zaplanowane związane są z załączaniem i wyłączaniem układu zgodnie z aktualnymi potrzebami, natomiast operacje nieplanowane występują najczęściej w przypadkach awaryjnych wyłączeń, na przykład podczas zwarć.

3.1 Rozruch elektrowni fotowoltaicznej

Sekwencje łączeń podczas rozruchu elektrowni fotowoltaicznej, który jest zawsze operacją zaplanowaną obejmują (Rysunek 2):

1. Zamykanie wyłącznika DC po stronie niskiego napięcia, następuje ładowanie kondensatora pośredniczącego (DC link) wynikające z poziomu nasłonecznienia.
2. Zamykanie wyłącznika próżniowego, transformator znajduje się w stanie jałowym.
3. Zamykanie wyłącznika AC po stronie niskiego napięcia, napięcie referencyjne zostaje doprowadzone do falownika.
4. Przesunięcie fazowe oraz częstotliwość napięcia sieciowego są monitorowane przez algorytm sterowania. Falownik zostaje zsynchronizowany z siecią, przepływ mocy może być kontrolowany poprzez odpowiednią zmianę napięcia wyjściowego falownika (kąt przesunięcia fazowego oraz amplituda).



Rysunek 2. Rozruch elektrowni fotowoltaicznej

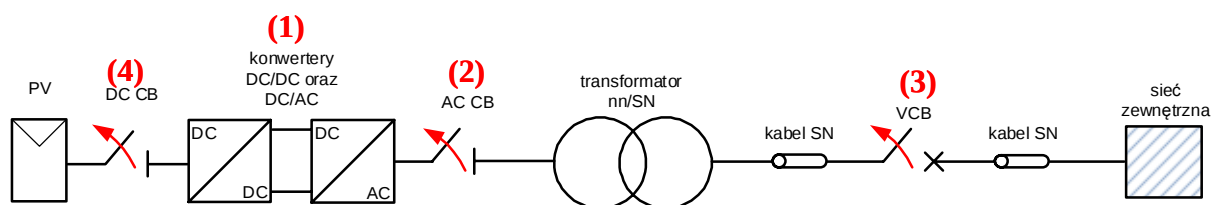
Podczas operacji nr 2, a więc zamykania wyłącznika, gdy transformator jest nieobciążony, występuje zagrożenie powstawania przepięć szybkozmiennych. Występowanie ponownych zapłonów łuku elektrycznego pomiędzy stykami wyłącznika jest częstym zjawiskiem przy tych operacjach. Mimo to eskalacja przepięć zazwyczaj nie występuje, zaś ich wartości szczytowe nie przekraczają maksymalnych wartości dopuszczalnych.

3.2 Planowane wyłączenie elektrowni fotowoltaicznej

Procesem odwrotnym do operacji załączania jest planowane wyłączenie elektrowni fotowoltaicznej. Zastosowanie poprawnej procedury wyłączania (Rysunek 3), w której ucięcie prądu w komorze wyłącznika próżniowego następuje przy zredukowanej wartości prądu, powinno zmniejszyć ryzyko powstawania przepięć szybkozmiennych.

Sekwencje łączeń są wówczas następujące:

1. Wyłączenie falownika – wysłanie sygnałów blokujących na bramki łączników energoelektronicznych.
2. Otwieranie wyłącznika AC po stronie niskiego napięcia – transformator znajduje się w stanie jałowym.
3. Otwieranie wyłącznika próżniowego, transformator zostaje wyłączony.
4. Otwieranie wyłącznika DC po stronie niskiego napięcia w stanie bezobciążeniowym.



Rysunek 3. Planowane wyłączenie elektrowni fotowoltaicznej

Otwieranie wyłącznika skutkuje narastaniem napięcia powrotnego pomiędzy jego stykami (TRV – *Transient Recovery Voltage*). Częstotliwość oscylacji wynika z zastępczych parametrów elektrycznych wyłączanego układu (np. transformator–kabel lub transformator–dławik). Podczas rozchodzenia się styków wyłącznika napięcie TRV narasta jednocześnie razem z wytrzymałością dielektryczną przerwy międzystykowej. Zakłada się liniowy przebieg narastania tej wytrzymałości. Szybkość narastania wytrzymałości międzystykowej wyłącznika próżniowego zależy w głównej mierze od szybkości rozchodzenia się styków. Literatura podaje bardzo szeroki zakres tych wartości (od 2 kV/ms do 50 kV/ms [14]). Podczas rozchodzenia się styków zapala się łuk elektryczny. Przy wartościach prądu rzędu 2–5 A łuk zostaje ucięty, co powoduje oscylacje napięcia TRV oraz równoczesny wzrost wytrzymałości dielektrycznej. Za każdym razem, kiedy TRV przekroczy wytrzymałość dielektryczną przerwy międzystykowej, łuk zapala się ponownie. Proces ten powtarza się do momentu aż wartość wytrzymałości dielektrycznej będzie wyższa niż wartość maksymalna napięcia TRV. Zjawisko to ma negatywny wpływ na izolację wyłączanego transformatora z uwagi na fakt, iż dla pewnych konfiguracji sieci generowane przepięcia charakteryzują się wysoką wartością szczytową, a także znaczącą stromością, nawet rzędu setek kilowoltów na mikrosekundę. Przyspiesza to procesy starzeniowe oraz degradacyjne układów izolacyjnych kabli, transformatorów oraz dławików.

4. ANALIZA PRZEPIĘĆ SZYBKOSMIENNYCH

Analizę przepięć szybkosmiennych przeprowadzono uwzględniając następujące elementy: wpływ topologii sieci (rodzaje aparatów i urządzeń, umiejscowienie kabli po stronie średniego napięcia), parametry wyłączanych transformatorów oraz rodzaj aparatury zainstalowanej po stronie niskiego napięcia. W szczególności skupiono uwagę na rodzaj filtrów LC falowników solarnych, poziom mocy generowanej przez panele fotowoltaiczne, a także dopuszczalne czasy wyłączeń elektrowni (grid codes).

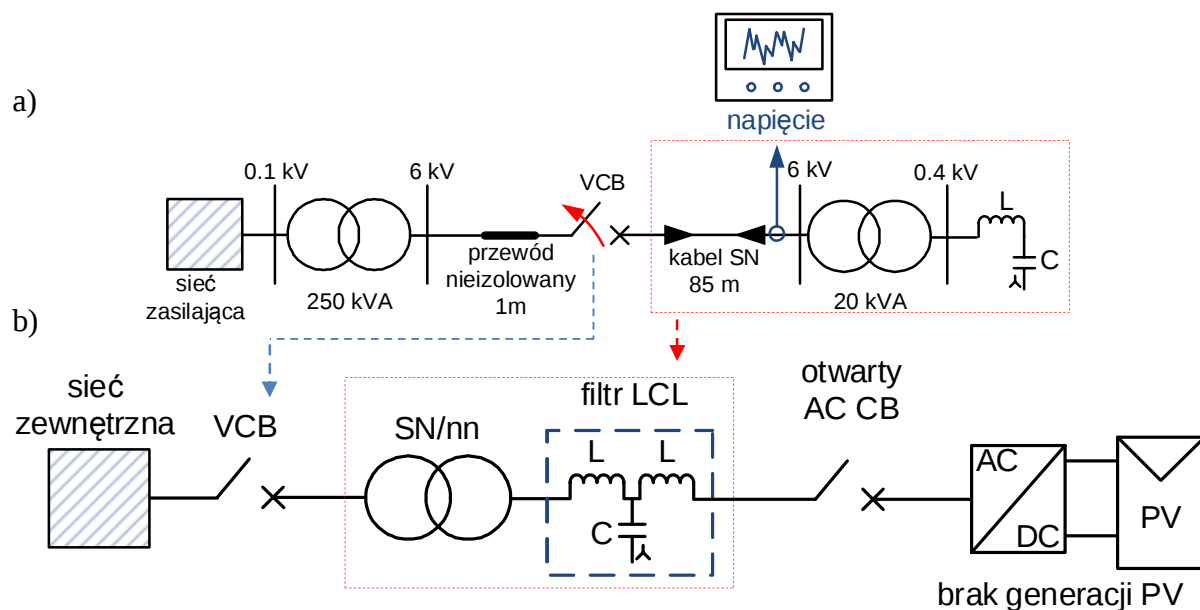
W pracy doktorskiej wykonano badania i symulacje, których celem było określenie ryzyka występowania wysokoczęstotliwościowych przebiegów przepięciowych w postaci ponownych zapłonów łuku elektrycznego podczas operacji łączeniowych elektrowni fotowoltaicznych wraz z identyfikacją parametrów aparatury w różnych topologiach sieci. Kolejne etapy w toku realizacji pracy przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Zakres badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych

ZAKRES PRAC	
CZEŚĆ 1	POMIARY LABORATORYJNE
	Badanie przebiegów łączeniowych generowanych wyłącznikiem próżniowym
	Wyłączanie transformatora – wyznaczenie stromości narastania wytrzymałości międzystykowej wyłącznika (<i>RRDS – Rate of Rise of Dielectric Strength</i>)
	Załączanie transformatora – wyznaczenie stromości obniżania wytrzymałości międzystykowej wyłącznika (<i>RDDS – Rate of Decrease of Dielectric Strength</i>)
	Pomiar ponownych zapłonów łuku
	Wyznaczenie wpływu filtrów LC falowników solarnych na przebiegi
	Badanie przebiegów łączeniowych generowanych wyłącznikiem AC po stronie nn
	Pomiar parametrów przebiegów
	Wyznaczenie wpływu filtrów LC falowników solarnych na przebiegi
CZEŚĆ 2	PRZYGOTOWANIE MODELI SYMULACYJNYCH W PROGRAMACH EMTP-ATP ORAZ PSCAD
	Opis procesu przygotowania modelu dla operacji wyłączania transformatora
	Opis procesu przygotowania modelu dla operacji załączania transformatora
	Weryfikacja i porównanie wyników pomiarów oraz wyników symulacji
	Wyjaśnienie wpływu filtrów LC na przebiegi łączeniowe
CZEŚĆ 3	SYMULACJE STANÓW PRZEJŚCIOWYCH
	Scenariusze łączeniowe dla elektrowni fotowoltaicznych
	Identyfikacja możliwych stanów przejściowych
	Nieudany rozruch elektrowni PV – wyłączanie prądu załączania transformatora
	Wyłączanie elektrowni PV – wyłączanie transformatora pod obciążeniem
	Awaryjne otwieranie wyłącznika próżniowego w stanach zwarciovych
	Sposoby tłumienia przebiegów łączeniowych
	Metody pasywne: ograniczniki przebiegów, RC snubbery, szeregowo dławiki RL
	Propozycja zastosowania metody aktywnej

4.1 Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne wykonano na stanowisku doświadczalnym przygotowanym w Laboratorium Wysokich Napięć Akademii Górniczo-Hutniczej (Rysunek 4). Obejmowały pomiary parametrów przebiegów przy wyłączaniu i załączaniu wyłącznikiem próżniowym nieobciążonego transformatora dystrybucyjnego. W badanym przypadku działanie falownika zostało pominięte – badano wpływ filtrów LC falowników solarnych na generowane przebiegi podczas operacji łączeniowych [7, 8].



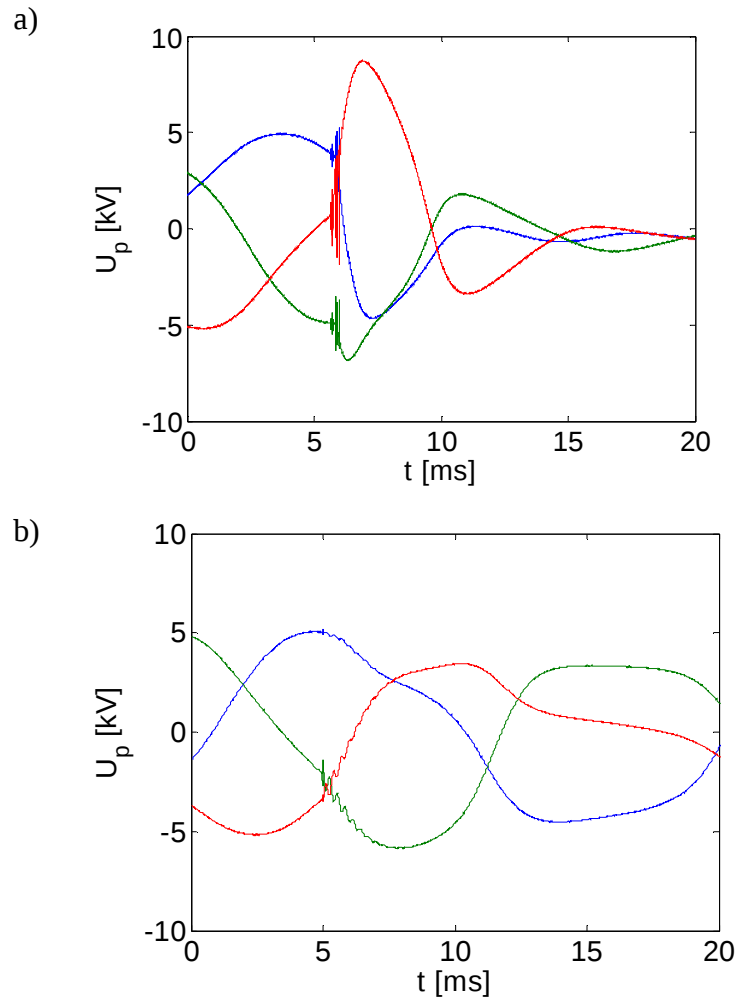
Rysunek 4. Układ laboratoryjny do badania przebiegów podczas wyłączania transformatora, a – schemat układu, b – interpretacja układu

Stanowisko laboratoryjne stanowiło odwzorowanie typowego fragmentu układu elektroenergetycznego z: transformatorem 250 kVA (15,75 kV/0,4 kV, $U_z = 4,5\%$, $I_0 = 0,25\%$), transformatorem 20 kVA (6 kV/0,4 kV, $U_z = 4,3\%$, $I_0 = 4,23\%$, pojemność uzwojenia strony pierwotnej względem ziemi $C_{pg} = 3$ nF, pojemność między uzwojeniami strony pierwotnej $C_{pp} = 0,2$ nF, pojemność między uzwojeniami strony pierwotnej a uzwojeniami strony wtórnej $C_{ps} = 5$ nF), wyłącznikiem próżniowym typu VD4 oraz połączeniem kablem średniego napięcia o długości 85 m i impedancji falowej $Z = 50 \Omega$. Napięcia szybkozmiennne mierzono na zaciskach wyłączanego transformatora 20 kVA za pomocą sondy wysokonapięciowej (1000:1) oraz oscyloskopu cyfrowego (próbkiowanie 1 GS/s). Wykazano wpływ filtrów LC falowników solarnych na przebiegi łączeniowe. Analizowano przebiegi dla różnych konfiguracji systemu oraz scenariuszy łążeń.

Przedstawione przykładowe wyniki pomiarów dotyczą następujących konfiguracji układu:

- konfiguracja 1: filtry LC niepodłączone,
- konfiguracja 2: filtry LC podłączone, $L = 200 \mu\text{H}$, $C = 25 \mu\text{F}$ (nieuziemiona gwiazda).

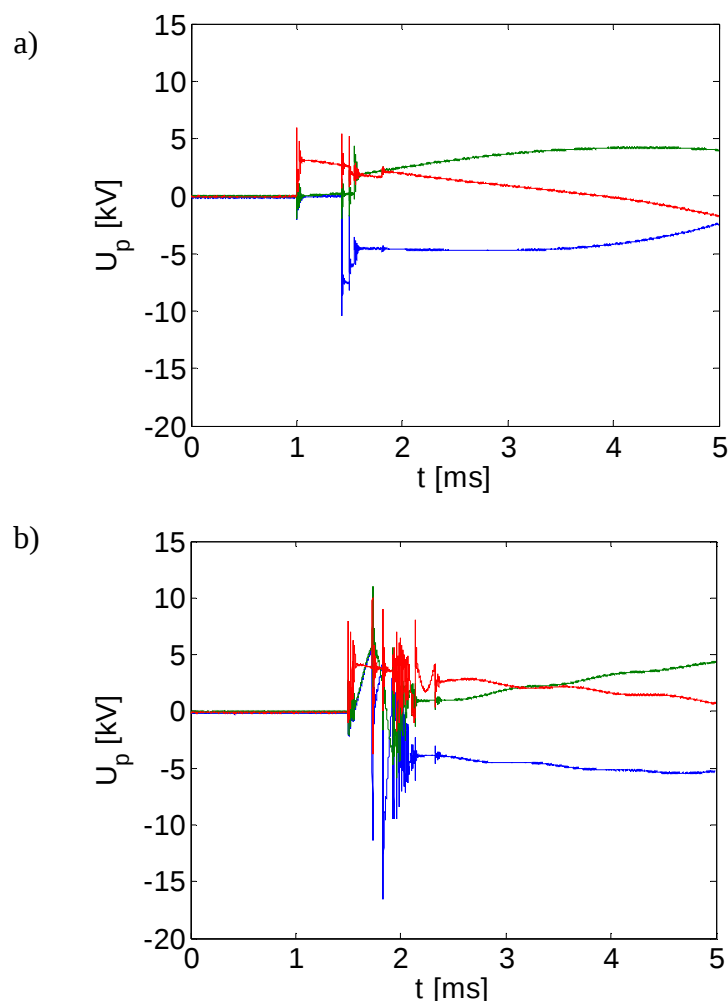
Zarejestrowane reprezentatywne przebiegi napięć na zaciskach wyłączanego transformatora 20 kVA dla operacji otwierania wyłącznika próżniowego obrazuje Rysunek 5.



Rysunek 5. Wyłączanie transformatora 20 kVA, pomiar napięcia na zaciskach średniego napięcia, a – konfiguracja bez filtrów LC, b – konfiguracja z filtrami LC: $L = 200 \mu H$, $C = 25 \mu F$

Jak można zauważyć na powyższych przebiegach, ponowne zapłony łuku są generowane podczas operacji otwierania wyłącznika próżniowego. Dla konfiguracji nr 2 (z filtrami LC) ponowne zapłony łuku zostały niemal całkowicie wyeliminowane, gdyż TRV narasta dużo wolniej niż wytrzymałość międzystykowa komory próżniowej. Jest to wynikiem tego, iż częstotliwość oscylacji f_n napięcia powrotnego TRV została znacząco zredukowana poprzez dołączenie do układu filtrów LC falownika solarne.

Przebiegi napięć zarejestrowane podczas operacji załączania transformatora obrazuje Rysunek 6.



Rysunek 6. Załączanie transformatora 20 kVA, pomiar napięcia na zaciskach średniego napięcia, a – konfiguracja bez filtrów LC, b – konfiguracja z filtrami LC: $L = 200 \mu H$, $C = 25 \mu F$

Pojemność filtra LC ma negatywny wpływ na generowane przebiegi. Po dołączeniu filtra z pojemnością $25 \mu F$ wzrosły wartości maksymalne przebiegów, stromość przebiegu du/dt oraz liczba ponownych zapłonów łuku. W konfiguracji nr 1 (bez filtrów LC) przebiegi wynikają głównie z ładowania pojemności uzwojeń strony pierwotnej transformatora (rzędu kilku nF). Dla konfiguracji nr 2, występują dodatkowe oscylacje. Zjawisko to można wytłumaczyć ładowaniem pojemności po stronie wtórnej transformatora, która wynika z obecności filtra LC. Ponadto, załączany transformator tworzy układ rezonansowy wraz z pojemnością filtra, który dołączony jest po stronie niskiego napięcia. Można również nadmienić, iż wpływ indukcyjności filtra ($200 \mu H$) jest znikomy z uwagi na fakt, iż jest ona pomijalnie mała w porównaniu z indukcyjnością rozproszenia uzwojeń transformatora. Szczegółową analizę tego przypadku przedstawiono w pracy doktorskiej. Ponadto, otrzymane rezultaty eksperymentów laboratoryjnych zostały potwierdzone w pracy w badaniach symulacyjnych w programach EMTP-ATP oraz PSCAD.

Szczegółowe podsumowanie wyników analizy przedstawia Tabela 3.

Tabela 3. Podsumowanie badań laboratoryjnych

Konfiguracja		U _p		du/dt	Ponowne zapłony łuku
		[kV _p]	[p.u.]	[kV/μs]	[maksymalna liczba]
załączanie transformatora					
1	filtry LC niepodłączone	10.3	2.10	24	6
2	L = 200 μH, C = 25 μF	16.4	3.35	36	12
wyłączanie transformatora					
1	filtry LC niepodłączone	9.8	2.00	27	9
2	L = 200 μH, C = 25 μF	5.9	1.20	5	1

4.2 Symulacje stanów przejściowych

Zgodnie z zakresem pracy, który został przedstawiony w Tabeli 2, część 2 pracy badawczej dotyczyła przygotowania modeli symulacyjnych na podstawie otrzymanych wyników pomiarów. Zastosowano odpowiednie sekwencje dopasowywania parametrów modelu, które pozwoliły na osiągnięcie wysokiej zbieżności wyników symulacji i pomiarów. Przygotowanie modeli symulacyjnych pozwoliło ponadto na poznanie różnic w modelowaniu komponentów badanej sieci w dwóch programach (EMTP-ATP oraz PSCAD). Oprócz stosowania modeli ze standardowych bibliotek zaimplementowano także modele własne w postaci skryptowej oraz blokowej. Parametry uszczegóławiające modele otrzymano z badań eksperymentalnych. Diagramy i procedury weryfikacyjne zostały przedstawione w pracy.

W części 3 przeanalizowano stany przejściowe, jakie mogą wystąpić w elektrowniach fotowoltaicznych z udziałem wyłącznika próżniowego. Scenariusze badano za pomocą symulacji numerycznych z uwagi na fakt, iż z przyczyn technicznych nie były one możliwe do zbadania w laboratorium. Badano stany awaryjne związane z wyłączaniem prądu załączania transformatora, a także te związane ze zwarciami, zarówno po stronie średniego jak i niskiego napięcia. Podsumowanie badań dla wszystkich przeanalizowanych konfiguracji przedstawia Tabela 4. Podano wartości maksymalne przepięć oraz ich stromości dla różnych scenariuszy łączeniowych. Wskazano również konieczność instalowania dodatkowych środków ochrony przeciwprzepięciowej.

Przedstawiona klasyfikacja scenariuszy łączeniowych może być z pewnymi zmianami również zastosowana do innych instalacji związanych z wyłącznikami próżniowymi, np. dla transformatorów dystrybucyjnych lub transformatorów pieców łukowych.

Tabela 4. Podsumowanie scenariuszy łączeniowych badanych w pracy

L.p.	Scenariusz	Wpływ filtrów LC ⁽⁴⁾	U_p [p.u.]	$\frac{du}{dt}$ dla $U_{TR}^{(3)}$ [kV/ μ s]	Wyłączany prąd	Dodatkowe urządzenia tłumiące
1	załączanie transformatora	negatywny	~ 2.0	< 30	n/d	opcjonalne ⁽¹⁾
2	przerywanie prądu załączania transformatora	n/d ⁽⁵⁾	> 2.5	> 50	kilkadziesiąt ÷ kilkaset A	konieczne ⁽²⁾
3	wyłączanie w stanie bezobciążeniowym	pozytywny, znaczący	~ 2.0	< 30	~ 100 mA	opcjonalne
					~ 1 A	opcjonalne
4	wyłączanie pod obciążeniem	pozytywny, znikomy	> 2.5	> 50	kilkanaście ÷ kilkadziesiąt A	konieczne
5	zwarcie po stronie niskiego napięcia	pomijalny	> 5.0	> 70	kilka ÷ kilkadziesiąt A	konieczne
6	zwarcie po stronie średniego napięcia	n/d ⁽⁵⁾	$0.2 \div 5^{(6)}$	< 30	kilkaset A	opcjonalne

⁽¹⁾ **opcjonalne** – urządzenia tłumiące mogą być zainstalowane, aczkolwiek nie są konieczne

⁽²⁾ **konieczne** – urządzenia tłumiące muszą być zainstalowane

⁽³⁾ U_{TR} – napięcie na zaciskach pierwotnych wyłączanego transformatora

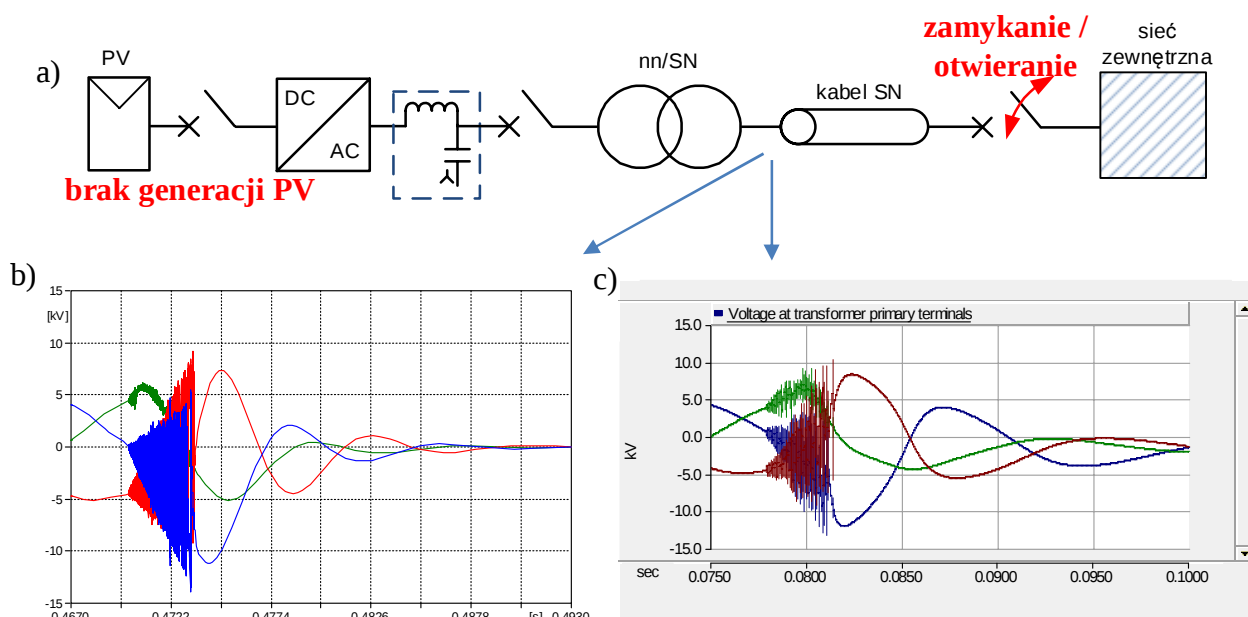
⁽⁴⁾ **filtry LC** podłączone po stronie wtórnej transformatora (na wyjściu falownika solarnego)

⁽⁵⁾ **filtry LC** są niepodłączone do strony wtórnej transformatora (wyłącznik niskiego napięcia AC otwarty)

⁽⁶⁾ W zależności od stromości narastania wytrzymałości dielektrycznej komory próżniowej

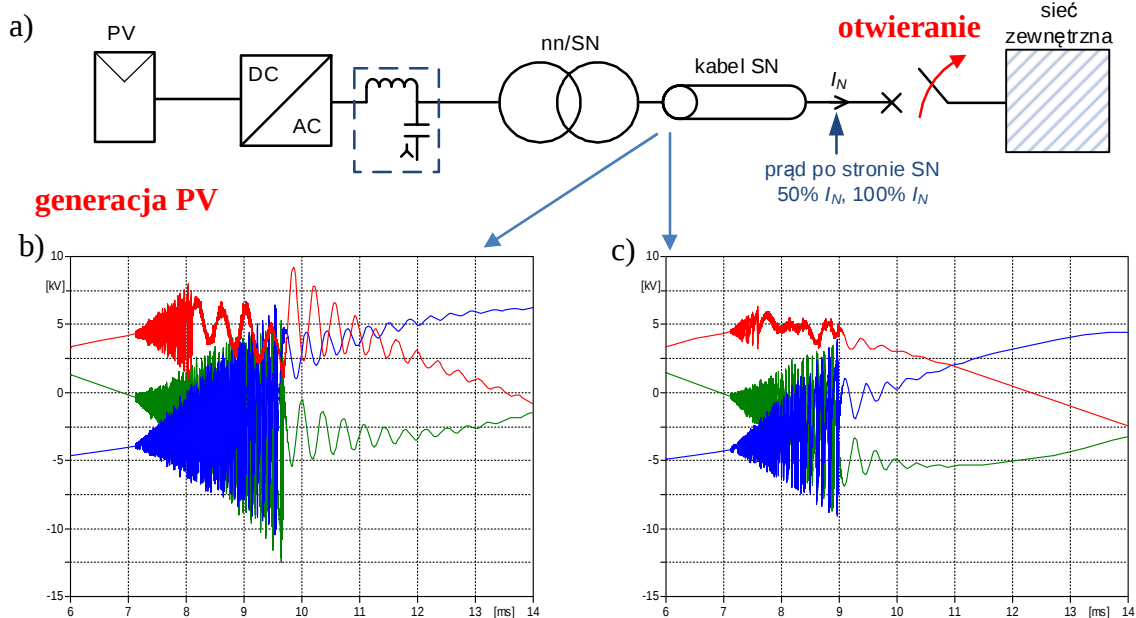
Wszystkie scenariusze zostały szczegółowo przedstawione w pracy doktorskiej. Podano graficzną interpretację każdego scenariusza wraz z przykładowymi przebiegami napięć i prądów zarejestrowanych podczas symulacji komputerowych. Zaprezentowano wpływ topologii sieci, warunków pracy oraz sekwencji łączeniowych na przepięcia szybkozmienne. W wybranych przykładach zaprezentowano zbieżność wyników obliczeń uzyskaną w programach EMTP-ATP oraz PSCAD.

Sekwencja łączeniowa nr 2 dotyczyła nieudanego załączania transformatora. W wyniku zamknięcia wyłącznika płynie prąd załączania transformatora o nieliniowym charakterze (*inrush current*). Kilkanaście milisekund po zamknięciu styków wyłącznik jest otwierany – taki scenariusz może być wynikiem błędnego sygnału sterującego lub niepoprawnej koordynacji urządzeń zabezpieczających. Przykładowe przebiegi napięcia mierzonego na zaciskach transformatora prezentuje Rysunek 7. Charakteryzują się one wysokimi wartościami przepięć oraz ich stromościami. Wynika to z faktu, iż wyłączany prąd może mieć wartość kilkadziesiąt lub nawet kilkaset amperów – palący się łuk podczas otwierania zostanie zatem zerwany przy pełnym prądzie ucięcia (~ 3 A).



Rysunek 7. Nieudane załączanie transformatora, otwieranie wyłącznika próżniowego przy przepływie prądu załączania transformatora, porównanie wyników w EMTP-ATP i PSCAD;
a – schemat sieci, b – wynik symulacji w EMTP-ATP, c – wynik symulacji w PSCAD

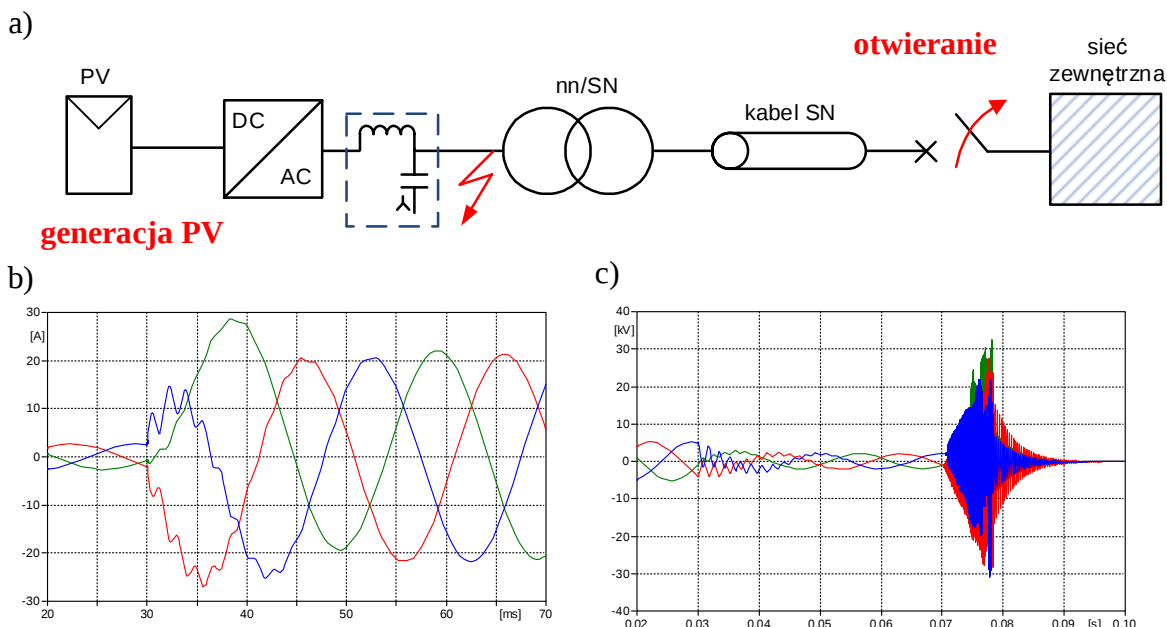
Analizę wpływu filtrów LC podczas wyłączania transformatora w stanie obciążenia (podczas generacji ze strony elektrowni fotowoltaicznej) przedstawia Rysunek 8. Transformator jest zasilany zarówno od strony sieci zewnętrznej, jak i od strony elektrowni fotowoltaicznej. Dla większego poziomu obciążenia przepięcia podczas wyłączania mają wyższe wartości szczytowe oraz stromości.



Rysunek 8. Wyłączanie transformatora pod obciążeniem, wpływ prądu obciążenia na przepięcia łączeniowe, a – schemat sieci, b – przebieg napięcia przy 100% I_N ,
c – przebieg napięcia przy 50% I_N

Podczas symulacji zaobserwowano również, iż wpływ filtrów LC na przepięcia w tym konkretnym scenariuszu jest dużo mniej widoczny niż podczas wyłączania transformatora nieobciążonego. Można to wyjaśnić faktem, iż prąd generowany po stronie elektrowni fotowoltaicznej ma charakter głównie rezystancyjny (moc czynna), zatem składowa pojemnościowa pochodząca od kondensatora filtra LC jest dużo mniejsza niż w stanie bezobciążeniowym. Pomimo to, w układzie z filtrami zauważono nieznaczne tłumienie przepięć – stromości oraz wartości szczytowe przepięć zostały zredukowane.

Scenariusze 5 i 6 dotyczyły operacji otwierania wyłącznika próżniowego w stanie zwarcia w systemie. Z punktu widzenia koordynacji izolacji oraz doboru urządzeń tłumiących opracowano wnioski z analizy wyłączania transformatora zwanego trójfazowo po stronie wtórnej (Rysunek 9). Podczas otwierania wyłącznika w takim układzie, przerywany prąd ma charakter indukcyjny o amplitudzie kilkunastu do kilkudziesięciu amperów. Prowadzi to do oscylacji napięcia powrotnego TRV o wysokiej stromości oraz wartości szczytowej znacznie przekraczającej wartości dopuszczalne.



Rysunek 9. Wyłączanie transformatora zwanego 3-fazowo po stronie wtórnej;
a – schemat sieci, b – prąd po stronie SN, c – napięcie po stronie SN

4.3 Sposoby tłumienia przepięć – wnioski i rekomendacje

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych, zaproponowano klasyfikację urządzeń tłumiących przepięcia (Tabela 5). Podsumowano aspekty techniczne oraz ekonomiczne. Wskazano również zalety i wady wszystkich analizowanych metod. Należy nadmienić, iż taka klasyfikacja może być stosowana nie tylko dla elektrowni fotowoltaicznych. Podobne zasady można stosować do transformatorów dystrybucyjnych, transformatorów pieców łukowych czy też transformatorów instalowanych na farmach wiatrowych.

Ograniczniki przepięć są odpowiednim urządzeniem tłumiącym wartości maksymalne przepięć zarówno pochodzenia łączeniowego jak i atmosferycznego. Nie zapewniają one jednak ograniczania stromości przepięć (du/dt), dlatego też można stosować dodatkowe środki ochronne w postaci RC snubberów lub dławików szeregowych RL. W pracy zaproponowano również metodę aktywną ograniczania przepięć poprzez zapewnienie odpowiednich sekwencji łączeniowych.

Tabela 5. Metody ograniczania przepięć – podsumowanie, du/dt – stromość napięcia, U_p – wartości szczytowe napięcia

Metoda tłumienia		Koszty	Instalacja	Ograniczanie du/dt	Ograniczanie U_p	Zastosowanie
Pasywne	ograniczniki przepięć	niskie	łatwa: w rozdzielni średniego napięcia	brak	znaczące	przepięcia łączeniowe i atmosferyczne
	RC snubbery	wysokie	problematiczna: duża ilość wymaganego miejsca	znaczące	znaczące dla przepięć łączeniowych, nie dla atmosferycznych	przepięcia łączeniowe
	dławiki szeregowo RL	niskie	łatwa: zintegrowana z izolatorem przepustowym transformatora	znaczące	znaczące	przepięcia łączeniowe
Aktywne	sekwencje łączeniowe	(*)	zintegrowane z algorytmami sterującymi	znaczące	znaczące	przepięcia łączeniowe

(*) – trudne do oszacowania na obecnym etapie, zależne od kosztów prac badawczo-rozwojowych

5. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych i symulacji pozwalają na stwierdzenie, iż możliwe jest określenie warunków pracy oraz topologii elektrowni fotowoltaicznej, w których operacje łączeniowe dokonywane wyłącznikiem próżniowym mogą doprowadzić do ponownych zapłonów łuku elektrycznego i przepięć szybkodziennych.

Efektom rozprawy doktorskiej jest analiza topologii i sekwencji łączeniowych elektrowni fotowoltaicznej przyłączanej do sieci elektroenergetycznej pod kątem ryzyka wystąpienia wysokoczęstotliwościowych przebiegów w postaci wielokrotnych zapłonów łuku elektrycznego. Przeprowadzono ocenę wpływu filtrów LC falownika solarnego na przepięcia. Ponowne zapłony łuku elektrycznego w wyłączniku próżniowym mogą wystąpić zarówno w

warunkach wyłączania jak i załączania transformatora wraz z układem elektrowni fotowoltaicznej. Rozważano przypadki transformatora w stanie obciążonym i jałowym oraz w stanie zwarcia w systemie. Zastosowanie odpowiedniej konfiguracji i parametrów filtra LC umożliwia wyeliminowanie tych zjawisk. Przedstawiona propozycja stosowania odpowiednich sekwencji łączy pozwala na zminimalizowanie ponownych zapłonów łuku elektrycznego podczas otwierania wyłącznika próżniowego. Zbadano przebiegi łączeniowe generowane podczas operacji łączeniowych wyłącznikiem AC zlokalizowanym po stronie niskiego napięcia elektrowni fotowoltaicznej.

Przeprowadzono symulacje scenariuszy łączeniowych dla elektrowni fotowoltaicznych oraz przebieg wysokoczęstotliwościowych w różnych węzłach elektrowni przyłączonej do sieci zewnętrznej, identyfikując krytyczne miejsca. Modelowanie prowadzono w dwóch środowiskach (EMTP-ATP i PSCAD) porównując ich złożoność i wyniki symulacji. Opracowano zaawansowane modele elementów urządzeń elektrycznych stosowanych w odwzorowaniu elektrowni fotowoltaicznej w formie skryptowej i blokowej w obydwu środowiskach. Osiągnięto wysoką zbieżność wyników symulacji oraz pomiarów laboratoryjnych. W doborze parametrów korzystano z przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Istotnym elementem jest dobór środków ochrony przebiegiowej. Zbadano możliwe sposoby tłumienia przebieg łączeniowych, przeanalizowano metody pasywne (ograniczniki przebiegów, RC snubbery, szeregowo-dławiki RL), zaproponowano wprowadzenie metody aktywnej poprzez dobór sekwencji łączeniowych oraz umożliwienie komunikacji między urządzeniami sterującymi wyłącznikiem próżniowym i falownikiem solarnym zainstalowanym w systemie.

Opracowane rozszerzone modele aparatów i urządzeń elektroenergetycznych, sekwencje łączy, analiza parametrów filtrów przekształtnikowych oraz zalecenia dotyczące metod ochrony przebiegiowej poszerzają możliwości koordynacji izolacji i mogą być przydatne w pracy projektowej i dalszych badaniach naukowych.

Analiza zachowania falownika podczas generacji przebiegów szybkochylnych przez wyłącznik próżniowy wydaje się być bardzo perspektywicznym kierunkiem dalszych badań, uwzględniającym także weryfikacje w oparciu o pomiary w elektrowni fotowoltaicznej przyłączonej do sieci zewnętrznej.

6. WYBRANA LITERATURA

- [1] ABB Technical Application Papers, No. 10: *Photovoltaic plants*, Italy, 2010
- [2] Craciun B-I., Kerekes T., Sera D., Teodorescu R.: *Overview of Recent Grid Codes for PV Power Integration*, 13th International Conference: Optimization of Electrical and Electronic Equipment OPTIM, ISBN 978-1-4673-1650-7, Brasov, 2012
- [3] *Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System Part 1: Expertise*, CIGRE Joint Working Group A2/C4.39, 2014
- [4] *Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System Part 2: Case Studies*, CIGRE Joint Working Group A2/C4.39, 2014
- [5] Glinkowski M.T., Gutierrez M.R., Braun D.: *Voltage escalation and reignition behavior of vacuum generator circuit breakers during load shedding*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, ISSN: 0885-8977, 1997
- [6] Jäger-Waldau A.: *PV Status Report 2013*, JRC Scientific And Policy Report, 2013
- [7] Kuczek T., Florkowski M., Piasecki W.: *Analyses of vacuum circuit breaker switching transients in medium voltage networks with respect to LC filters of solar converters*, International Conference on High Voltage Engineering and Application ICHVE; Poznań, 2014
- [8] Kuczek T., Florkowski M.: *Vacuum circuit breaker switching in photovoltaic power plants - investigation on overvoltage generation for various network topologies and network conditions*, European EMTP-ATP Users Group Meeting EEUG, Dublin, 2013
- [9] Mohan N., Undeland T., Robbins W.: *Power electronics: converters, application and design*, John Wiley&Sons, ISBN 978-0-471-22693-2, 2003
- [10] Ning Du, Yonggang Guan, Jingsheng Zhang, Jirong Niu, Shuhua Yao, Guozheng Xu: *Phenomena and Mechanism Analysis on Overvoltages Caused by 40.5 kV Vacuum Circuit Breakers Switching Off Shunt Reactors*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.26, ISSN: 0885-8977, 2011
- [11] Rahim N.A., Selvaraj J.: *Multistring Five-Level Inverter With Novel PWM Control Scheme for PV Application*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.57, ISSN: 0278-0046, 2010
- [12] RENI – Renewables Insight: *PV Power Plants – Industry Guide*, 2011
- [13] Shipp D., Dionise T., Lorch V., MacFarlane B.: *Transformer Failure due to Circuit-Breaker-Induced Switching Transients*, ISSN 0093-9994, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 2, 2011
- [14] Slade P.G.: *The Vacuum Interrupter: Theory, Design and Application*, ISBN 978-0-8493-9091-3, CRC Press, 2008
- [15] Smith R.K.: *Tests Show Ability of Vacuum Circuit Breaker to Interrupt Fast Transient Recovery Voltage Rates of Rise of Transformer Secondary Faults*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, ISSN: 0885-8977, 1995
- [16] Twining E., Holmes D. G.: *Grid Current Regulation of a Three-Phase Voltage Source Inverter With an LCL Input Filter*, ISSN 0885-8993, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 18, No. 3, 2003
- [17] IEC 60071-1: *Insulation co-ordination, Part 1: Definitions, principles and rules*, 2006