

Tomasz Chmielewski
Politechnika Lubelska

WPLYW PRĄDU ZAŁĄCZANIA TRANSFORMATORA NA PRACĘ PRZEKSZTAŁTNIKA SIECIOWEGO

IMPACT OF POWER TRANSFORMER INRUSH CURRENT ON OPERATION OF GRID CONNECTED POWER CONVERTER

Streszczenie: Celem artykułu jest przedstawienie wpływu na pracę przekształtników energoelektronicznych zaburzeń w sieci o wysokiej impedancji zwarciowej wywołanych podczas załączania transformatora elektroenergetycznego w stacji SN/nn. Powyższe zagadnienie leżące na pograniczu elektroenergetyki i energoelektroniki jest rzadko poruszane w dostępnych opracowaniach. Dzieje się tak pomimo faktu, iż konsekwencją przepływu prądu załączania transformatora może być wystąpienie przepięć dorywczych o niepomijalnej wartości i czasie trwania. Na podstawie symulacji przeprowadzonych w programie EMTP-ATP pokazano, iż w wyniku zaburzeń napięcia możliwe jest niewłaściwe działanie układu sterowania przekształtnika prowadzące do jego awaryjnego wyłączenia. Aby temu zapobiec, zaprezentowano układ sterowania przekształtnika z zastosowaniem filtrów sygnału SOGI, który jest odporny na zaburzenia tego typu.

Abstract: This paper presents the influence of voltage disturbances caused by inrush current of the power transformer in weak networks on operation of power electronic converter. The topic described herein that is relevant both from power electronics and power systems engineering perspectives is hardly addressed in the literature. This is despite the fact that power transformer energization may result in flow of highly distorted currents with excessive amplitudes. Based on the simulations conducted in EMTP-ATP it has been demonstrated that, temporary overvoltages of significant value and duration may arise. In consequence the control algorithm of the power converter operating in the same system may lose its ability to track the reference conditions which results in an emergency trip. In order to prevent it, the robust control algorithm with use of SOGI filters was proposed. Proposed control is immune to analysed type of voltage disturbance.

Słowa kluczowe: *załączanie transformatora, przepięcia dorywcze, przekształtnik sieciowy*

Keywords: *transformer energization, temporary overvoltages, grid tied converter*

1. Wstęp

Przekształtniki energoelektroniczne stały się w ostatnich latach istotnym elementem dzisiejszej energetyki, przemysłu oraz transportu [1]–[4]. Elastyczność pracy oraz wysoka wydajność tych urządzeń sprawia, iż są one coraz częściej wręcz niezestąpione w niektórych zastosowaniach takich jak napęd elektryczny, ładowarki samochodowe oraz produkcja energii elektrycznej. Pośród ww. zastosowań, prym w dziedzinie energetyki oparta o odnawialne źródła energii takie jak wiatr czy energia słoneczna. W ostatnich latach szczególnie dynamicznie rozwija się sektor związany z elektrowniami słonecznymi także w skali mikro. Co więcej, można spodziewać się dalszego utrzymania się tego trendu, co poprzez zwiększanie udziału źródeł rozproszonych w sieci elektroenergetycznej jest wyzwaniem dla jej operatorów. Dlatego obecne wymagania dotyczące jakości energii dostarczanej do sieci sprawiają, iż nie jest możliwe uzyskanie

zadawalających parametrów wyjściowych źródła energii w sposób inny niż stosując energoelektroniczne układy przekształtnikowe. Niestety, sieć elektroenergetyczna narażona jest na liczne zaburzenia, które nie pozostają bez wpływu na pracę przekształtników sieciowych. Większość zaburzeń ujawnia się w napięciu zasilającym, którego parametry w idealnym przypadku powinny być niezmiennie w zakresie częstotliwości, amplitudy oraz fazy. Niemniej jednak, powszechne są zapady napięć (symetryczne lub asymetryczne), przepięcia dorywcze, łączeniowe itp. Z tej przyczyny, niezmiernie ważne jest zapewnienie poprawnej pracy przekształtników sieciowych a nade wszystko uniknięcia nagłego odłączenia od sieci tzw. Fault Right Through (FRT) [5]. Jest to niezmiernie ważny aspekt stabilności sieci, regulowany i rygorystycznie przestrzegany w większości krajów przez operatorów sieci. Jednakże, regulacje te są rzadko stosowane w przypadku zaburzeń o charakterze nieustalonym

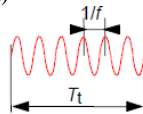
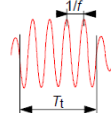
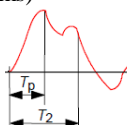
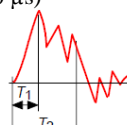
takich jak np. przepięcia dorywcze związane z załączaniem transformatorów. Niniejszy artykuł podejmuje tematykę pracy przekształtnika sieciowego w obliczu stanów wyżej wymienionych niustalonych związanych z załączaniem transformatorów. Negatywny wpływ zaburzeń napięcia o podobnym zakresie częstotliwości, na pracę przekształtnika wykazano w [6], co potwierdza istotność problemu. Zaprezentowano odpowiedź typowego układu sterowania na tego typu zaburzenie występujące w sieci o małej mocy zwarciowej. Zaproponowano również jego rozszerzenie o filtry SOGI (Second Order Generalized Integrator) w celu uzyskanie lepszej stabilności pracy przekształtnika.

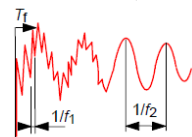
2. Zaburzenia występujące w sieciach elektroenergetycznych

2.1 Klasyfikacja zaburzeń napięcia w sieciach elektroenergetycznych

Zaburzenia napięcia są powszechnie klasyfikowane w dziedzinie częstotliwości. Ten podział jest przedstawiony np. w normie IEC 60071-1 (Tabela 1).

Tabela 1. Klasyfikacja zaburzeń napięcia sieciowego [7]

Grupa	Wybrane przykłady
Niskoczęstotliwościowe ciągłe ($f = 50 \text{ Hz}$ lub 60 Hz , $T_t > 1 \text{ h}$) 	<ul style="list-style-type: none"> - Efekt Ferrantiego - Przeciężenia długotrwałe - przekompensowanie
Niskoczęstotliwościowe dorywcze ($10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$, $0.02 < T_t < 3600 \text{ s}$) 	<ul style="list-style-type: none"> - zwarcia - ferorezonans - załączanie transformatora/dławika - odłączenie obciążenia
Przejściowe o łagodnym czole ($20 \mu\text{s} < T_p < 5000 \mu\text{s}$, $T_2 < 20 \text{ ms}$) 	<ul style="list-style-type: none"> - operacje łączeniowe (zwarcia, linie, kable, baterie kondensatorów, transformatory, dławiki)
Przejściowe o stromym czole ($0.1 \mu\text{s} < T_1 < 20 \mu\text{s}$, $T_2 < 300 \mu\text{s}$) 	<ul style="list-style-type: none"> - przepięcia piorunowe - operacje łączeniowe z użyciem wyłączników próżniowych

Grupa	Wybrane przykłady
Przejściowe o bardzo stromym czole ($T_f < 100 \text{ ns}$, $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 0.1 \text{ GHz}$, $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$) 	<ul style="list-style-type: none"> - operacje zamykania bądź otwierania odłączników w stacjach izolowanych gazem SF₆

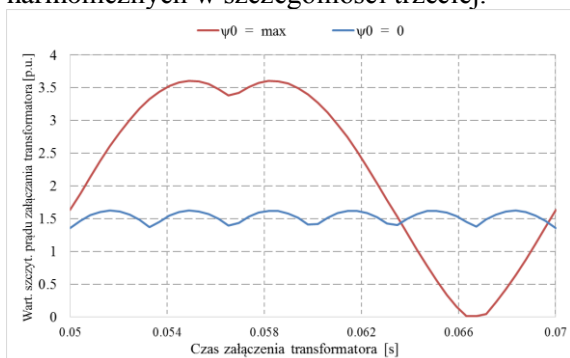
Jak ukazuje Tabela 1 przepięcia dorywcze powstające podczas załączania transformatora są zakłóceniami niskoczęstotliwościowymi. Trzeba w tym miejscu nadmienić, iż z punktu widzenia pracy oraz sterowania przekształtnika energoelektronicznego, narażenia o wysokich częstotliwościach są od niej zależne w małym stopniu. Wynika to z faktu, iż współczesne przekształtniki sieciowe pracują z częstotliwością przełączeń dochodzącą jedynie do kilkudziesięciu kHz.

2.2 Załączenie transformatora jako źródło zaburzeń napięcia

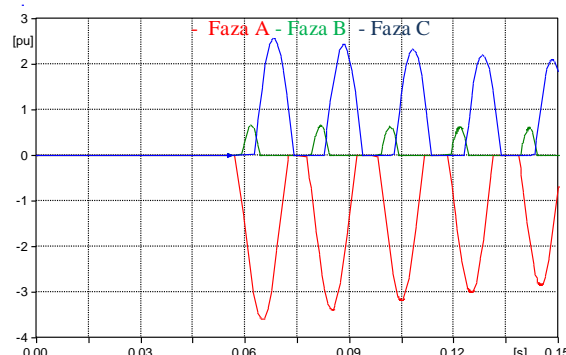
Jako szczególnie niebezpieczny przypadek zaburzeń o charakterze dorywczym można przyjąć te związane z załączaniem transformatorów mocy. Jest tak ze względu na fakt, iż związane są one zarówno z przepięciami jak i z prądami o znacznych amplitudach. Z tego powodu możliwe jest także pobudzenie automatyki zabezpieczeniowej i w konsekwencji wyłączenie prądu rozruchowego, co z kolei implikuje powstanie przepięcia łączeniowego o łagodnym czole. Jednakże z punktu widzenia pracy energoelektronicznego przekształtnika sieciowego to właśnie te zaburzenia napięcia są kluczowe. Niemniej jednak są one wprost zależne od prądu załączania transformatora oraz parametrów sieci. Najgorszym przypadkiem są wysokie wartości prądu rozruchowego w sieci o niskiej mocy zwarciowej (stabilność napięcia spada wraz z mocą zwarciową). Jako, że załączanie transformatora odbywa się zawsze w stanie bezobciążeniowym, prąd rozruchowy jest zależny od magnetycznych właściwości rdzenia (charakterystyki magnesowania i strumienia remanencji ψ_0) oraz chwili załączenia. Biorąc pod uwagę zależność strumienia magnetycznego od napięcia (równanie (1)), z której wprost wynika 90° przesunięcie można zidentyfikować najbardziej niekorzystną chwilę załączania, dla której prąd rozruchowy będzie największy.

$$\psi(t) = \int u(t)dt + \psi_0 = \int U \sin(\omega t)dt + \psi_0 = -\frac{U}{\omega} \cos(\omega t) + \psi_0 \quad (1)$$

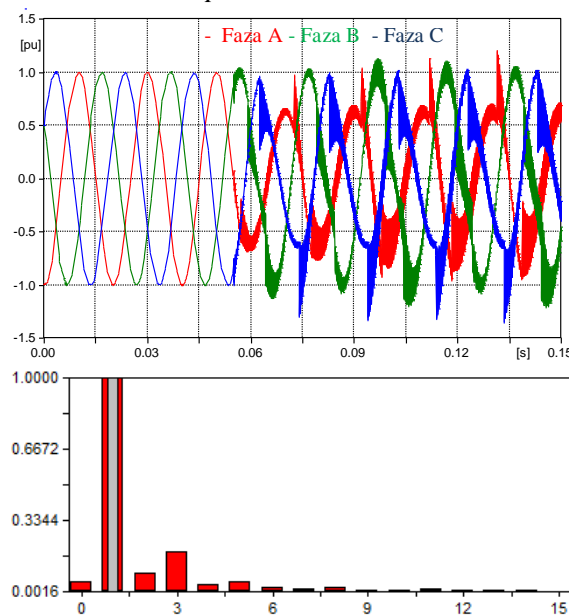
Jak podaje norma IEC 60076 – 8 warunki takie stwarza wystąpienie maksymalnej wartości strumienia remanencji oraz załączenie w zerze napięcia [8], [9]. Powyższe rozważania obrazuje także rys. 1, na którym przedstawiono wyniki parametrycznej symulacji ze zmiennym czasem załączania transformatora. Zaobserwować można, iż maksymalna amplituda prądu załączania transformatora o mocy 11 MVA po stronie 6 kV w jednostkach względnych odniesionych do wartości prądu znamionowego, zależy wprost od chwili załączania oraz strumienia remanencji. W przypadku braku strumienia remanencji ψ_0 , prąd rozruchu nieznacznie przekracza 150% podczas gdy w obecności maksymalnego ψ_0 sięga on niemalże czterokrotnej wartości prądu znamionowego. Rys. 2 przedstawia przebieg prądu dla największej zidentyfikowanej amplitudy. Można zaobserwować, iż prąd ten jest wyraźnie zniekształcony i w dwóch fazach znacznie przekracza wartość prądu znamionowego. Rys. 3 natomiast, obrazuje przebieg napięcia fazowego w odniesieniu do wartości znamionowej oraz rozkład Fouriera do 15 harmonicznej. Można zauważyć przepięcia sięgające 1,2 pu oraz występowanie wyższych harmonicznych w szczególności trzeciej.



Rys.1. Maksymalna amplituda prądu załączania transformatora zmierzona w trzech fazach w funkcji czasu zamknięcia wyłącznika (50 symulacji w czasie 0,02 s)



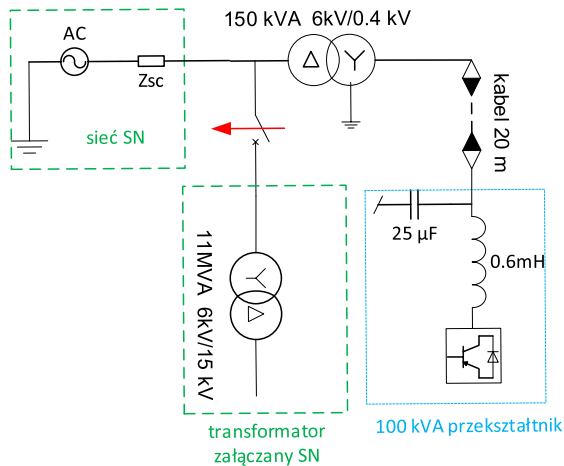
Rys.2. Prąd załączania transformatora 11 MVA, 15kV/6kV po stronie 6 kV



Rys.3. Napięcie podczas załączania transformatora 11MVA 15kV/6kV po stronie 6 kV oraz rozkład Fouriera w fazie A (czerwonej).

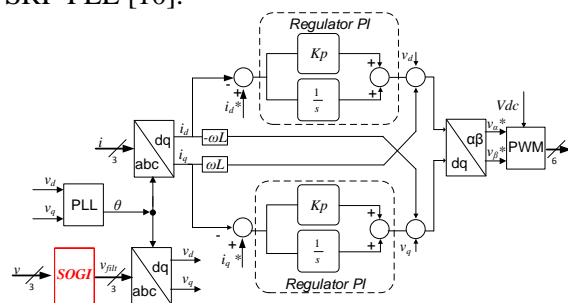
3. Praca oraz sterowanie przekształtnika sieciowego

Zburzenia powstające podczas załączania transformatora, omówione w rozdziale drugim, mogą wpływać na pracę przekształtnika w układzie przedstawionym na rys. 4. Jest to spowodowane niską częstotliwością zakłóceń, które mogą być przenoszone na stronę nn transformatora sprzęgającego. Pomiary napięcia oraz prądu niezbędne do poprawnego funkcjonowania układu sterowania wykonywane mogą być zatem na zakłóconych wielkościach. Przez to, transformacje do układu odniesienia używanego w algorytmie sterowania działają niepoprawnie, co przekłada się na pogorszenie warunków stabilności układu sterowania, jeżeli nie uwzględnił on tego rodzaju zdarzeń.



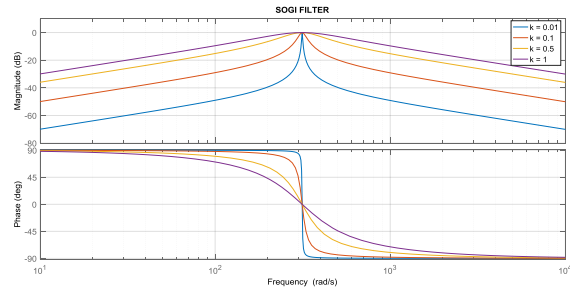
Rys. 4 Schemat zastępczy fragmentu sieci SN/nn z przekształtnikiem energoelektronicznym po stronie nn

Przyjęto, że przekształtnik sterowany jest według orientacji wektora napięcia (Voltage Oriented Control) i posiada regulatory PI [1]. Wymaga to przekształcenia prądów i napięć fazowych do układu wirującego $dq0$ (transformacja Park'a). Sygnały prądu i napięcia wykorzystywane są do synchronizacji oraz sterowania, jak to pokazano na rys.5. Do synchronizacji zastosowano standardowy układ SRF-PLL [10].



Rys.5. Układ sterowania z opcjonalnym filtrem SOGI

Jak można zaobserwować na rys. 5, w pętli sterowania zaproponowano umieszczenie dodatkowych filtrów napięcia, których zadaniem jest poprawa stabilności układu sterowania. Filtry SOGI reprezentowane są przez człon rezonansowy dostrojony na częstotliwość sieciową, które nie wprowadzają przesunięcia fazowego [11]. Mogą one zostać zatem wykorzystane do filtrowania sygnałów sinusoidalnych. Transmitancja filtra SOGI jest przedstawiona w równaniu (2) a jego charakterki amplitudowo-fazowe na rys. 6.



Rys.6. Charakterystyka amplitudowo-fazowa filtra SOGI dla różnych wartości współczynnika tłumienia k

$$H(s) = \frac{k\omega_n s}{s^2 + k\omega_n s + \omega^2} \quad (2)$$

Wpływ obecności filtra SOGI w układzie sterowania zobrazowany jest na podstawie wyników symulacji w rozdziale 5.

4. Opis analizowanej sieci

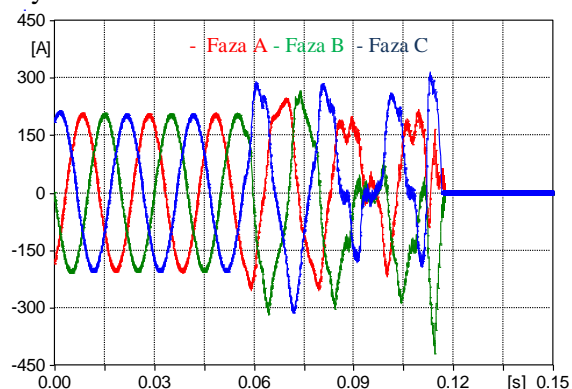
Analizowany system przedstawiony jest na rys. 4. Założono parametry zwarciove sieci zapewniające małą sztywność sieci $U_n = 6$ kV, $S_k'' = 50$ MVA, $X/R = 20$. Kable oraz linie napowietrzne występujące w sieci elektroenergetycznej zostały zamodelowane, jako pojemność $C = 400$ nF. Parametry załączanego transformatora oraz transformatora sprzęgającego podane są w tabeli 2. Pojemności doziemne oraz międzyuzwojeniowe oszacowano w oparciu o normę IEEE Std. C37.011-2011 [12]. Model transformatora 150 kVA nie uwzględniał charakterystyki magnesowania rdzenia. Natomiast transformator załączany zgodnie z normą IEC 60071-4 posiada liniową charakterystykę magnesowania do $1.2U_n$ oraz o nachyleniu 30% w regionie nasycenia [13]. Parametry 20 m kabla po stronie nn są następujące: $R = 7,54e-5$ Ω/m , $L = 0,000293$ mH/m, $C = 0,00072$ $\mu F/m$. Parametry filtra LC tranzystorowego przekształtnika dwupoziomowego oraz układ sterowania widoczne są odpowiednio na rys. 4 i rys.5. Tranzystory zamodelowane zostały jako klucze idealne. Częstotliwość modulatora PWM wynosiła 7.5 kHz, sztywne zasilanie po stronie DC miało napięcie 650 V, a założony próg wyłączenia przekształtnika opierał się na wartości prądu w układzie odniesienia $dq0$ i wynosił 400 A (po jego przekroczeniu następowało zablokowanie sygnałów bramkowych). Model wykonano w programie EMT-P-ATP.

Tabela 2. Parametry transformatora

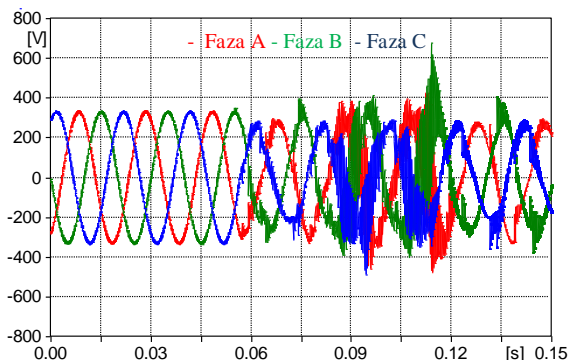
Parametr	Transformator 11MVA	Transformator 150 kVA
Grupa połączeń	Dy5	Dyn11
Napięcia znamionowe	15 kV/6 kV	6 kV/0,4 kV
S_N	11 MVA	150 kVA
$U_{\%}$	5 %	4%
I_0	0,3 %	0,5%
ΔP_{Cu}	60 kW	2 kW
ΔP_{Fe}	12 kW	0,4kW
C_{p-g}	4,2 nF	2,9 nF
C_{s-g}	2,9 nF	2,3 nF
C_{p-s}	1,8 nF	1 nF

5. Wyniki badań symulacyjnych

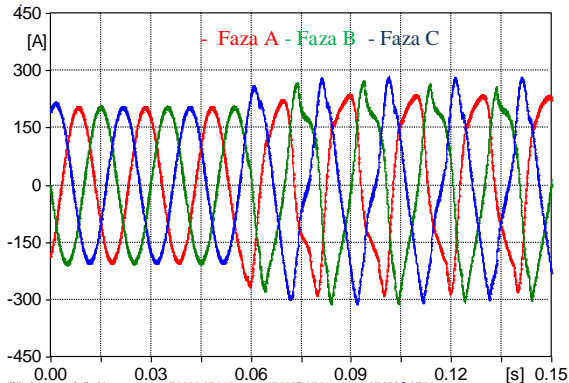
Badanie symulacyjne wykonano dla warunków napięciowych i prądowych przedstawionych na rys. 4. Wybrano najbardziej niekorzystne warunki w celu sprawdzenia działania filtrów SOGI. Dlatego prąd rozruchowy stanowi wielokrotność prądu znamionowego transformatora. Przekształtnik oddaje do sieci 100 kW mocy czynnej przy $\cos\phi = 1$. W tej samej konfiguracji przebadano układ bez oraz z zastosowaną filtracją napięć. Załączenie transformatora 11 MVA następuje w $t = 0,0549s$, przy użyciu wyłącznika pokazanego na rys. 3. Częstotliwość rezonansowa filtra SOGI to 50 Hz, a współczynnik tłumienia wynosi $k = 1$.



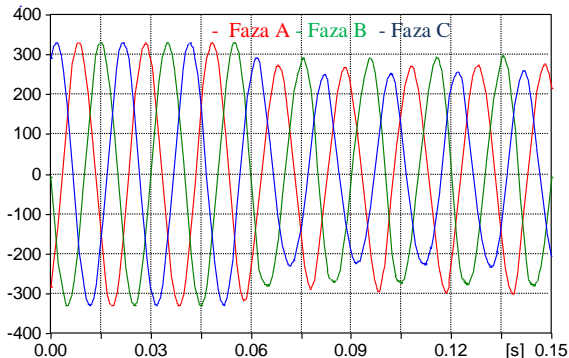
Rys.7. Prąd przekształtnika. Układ sterowania bez filtracji napięcia



Rys.8. Nieodfiltrowane napięcia zmierzone po stronie nn



Rys.9. Prąd przekształtnika. Układ sterowania z zastosowaną filtracją napięcia



Rys.10. Odfiltrowane napięcia zmierzone po stronie nn

Rys. 7 i rys. 8 przedstawiają pracę układu bez filtracji mierzonych napięć. Można zaobserwować, iż układ sterowania traci stabilność i w przeciągu około 50 ms od momentu wystąpienia zaburzenia następuje awaryjne zablokowanie sygnałów bramkowych. Dla dużych mocy przekształtnika nagłe wyłączenie może prowadzić do kolejnego zaburzenia w napięciu sieciowym. W przypadku układu z filtracją sygnałów pomiarowych widać, iż pomimo odkształceń przebiegu prądu przekształtnika (rys. 9) układ jest stabilny. Rys. 10 dobrze obrazuje właściwości filtracyjne układu SOGI.

6. Podsumowanie oraz wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono wpływ zaburzeń napięcia wywołanych przepływem prądu załączania transformatora w sieci 6 kV na pracę przekształtnika sieciowego. Prąd załączania transformatora jest krytyczny z punktu widzenia prawidłowej pracy systemu elektroenergetycznego. Pomimo faktu, iż samo zjawisko wynika z nieliniowości rdzenia, jest ono w pewnym stopniu przewidywalne. Jak pokazano w niniejszym artykule, wartość prądu załączania transformatora zależy głównie od dwóch czynników mianowicie czasu załączania oraz strumienia remanencji. Z wyników symulacji parametrycznych można wywnioskować, iż odpowiednio dobierając czas zamknięcia poprzez synchronizację łączeń, można uniknąć udarów prądowych, które mogą prowadzić nie tylko do przeciążeń prądowych, ale także mechanicznych uszkodzeń uzwojeń transformatora. Na podstawie badań symulacyjnych pokazano, iż możliwe jest zaburzenie pracy układu sterowania, w skutek którego nastąpić może nastąpić awaryjne wyłączenie przekształtnika. Niepoprawna praca słaboprądowego układu regulacji w stanach nieustalonych widoczna jest w części silnoprądowej przekształtnika połączonej z siecią. Pokazano również, iż przy użyciu prostych modyfikacji w układzie sterowania takich jak filtracja sygnałów pomiarowych (w tym przypadku przy użyciu filtrów SOGI), możliwa jest poprawa stabilności układu sterowania, a co za tym idzie uniknięcie wyłączenia awaryjnego. Filtracja sygnałów, pomimo, iż rozpowszechniona w układach sterowania musi zostać dobrana do spodziewanego zaburzenia. Do tego niezbędna jest świadomość, iż m.in. przepięcia łączeniowe są istotne dla pracy układu regulacji.

7. Literatura

- [1] A. Timbus, M. Liserre, R. Teodorescu, P. Rodriguez, and F. Blaabjerg, "Evaluation of current controllers for distributed power generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 3, pp. 654–664, Mar. 2009.
- [2] P. Veena, V. Indragandhi, R. Jeyabharath, and V. Subramaniaswamy, "Review of grid integration schemes for renewable power generation system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 628–641, 2014.
- [3] J. W. Choi and S. K. Sul, "Fast current controller in three-phase AC/DC boost converter using d-q axis crosscoupling," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 1, pp. 179–185, 1998.
- [4] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 691–703, 1998.
- [5] W. Jarzyna and P. Lipnicki, "The comparison of Polish grid codes to certain European standards and resultant differences for WPP requirements," *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1–6, 2013.
- [6] C. Li, "On Capacitor Switching Transient Immunity of Inverter-Based Renewable Generations," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 5, pp. 2339–2345, 2015.
- [7] IEC Standard, "IEC 60071-1 Insulation coordination – Part 1: Definitions, principles and rules Coordination," 2011.
- [8] IEC Standard, "IEC 60076-8 Power transformers – Application guide," 2002.
- [9] J. Horiszny, "Influence of circuit breaker operation upon transformer's residual flux and inrush current," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 83, no. 11, pp. 208–211, 2007.
- [10] D. Zielinski, P. Lipnicki, and W. Jarzyna, "Synchronization of voltage frequency converters with the grid in the presence of notching," *COMPEL Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 657–673, 2015.
- [11] N. F. Roslan, J. A. Suul, A. Luna, I. Candela, and P. Rodriguez, "A Simulation Study of Proportional Resonant Controller Based on the Implementation of Frequency- Adaptive Virtual Flux Estimation with the LCL Filter," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE*, pp. 1934–1941, 2015.
- [12] IEEE Std. C37.011-2011, "IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers," 2011.
- [13] IEC Standard IEC 60071-4, "Insulation coordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks," 2004.

Autor

mgr inż. Tomasz Chmielewski
 e-mail: tomasz.chmielewski@pollub.pl
 Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 Politechnika Lubelska
 ul. Nadbystrzycka 38a
 20-618 Lublin