

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Artur Polak
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

OCHRONA UKŁADU IZOLACYJNEGO TRANSFORMATORA WSPÓLPRACUJĄCEGO Z FALOWNIKAMI

PROTECTION OF THE TRANSFORMER INSULATION SYSTEM COOPERATING WITH INVERTERS

Streszczenie: Farmy fotowoltaiczne są łączone z siecią elektroenergetyczną poprzez falownik DC/AC i transformator. Komutacja prądu w zaworach falownika generuje w indukcyjnościach rozproszenia impulsy napięcia, które oddziałują na układ izolacyjny uzwojeń transformatora. Skuteczną ochronę izolacji uzwojeń transformatora przed przepięciami stanowią filtry tłumiące. Mogą to być kondensatory bądź warystory. Filtr w sposób znaczący poprawia warunki dielektryczne izolacji uzwojenia transformatora.

Abstract: The solar farms are connected to the electricity grid through a DC / AC inverter and a transformer. The current commutation in the inverter valves generates voltage pulses in the leakage inductances, which act on the insulation system of the transformer windings. Suppression filters provide effective protection of the transformer winding insulation against overvoltage. These can be capacitors or varistors. The filter significantly improves the dielectric conditions of the transformer winding insulation.

Słowa kluczowe: transformator, falownik, kondensatory, warystory

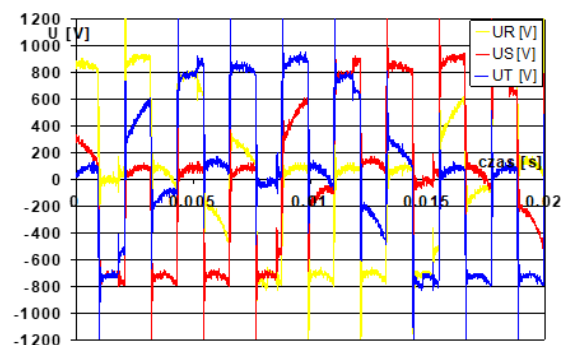
Keywords: transformer, inverter, capacitors, varistors

1. Wstęp

Układy izolacyjne transformatorów współpracujących z falownikami, o modulacji szerokości impulsów MSI (ang. *Pulse-Width Modulation PWM*), są narażone na przyspieszone starzenie się. W obwodach elektrycznych układu przetwarzającego energię są indukcyjności. Są to indukcyjności rozproszenia uzwojenia transformatora, a także indukcyjności przewodów, łączących źródło napięcia z falownikiem i falownik z transformatorem. Komutacja prądu w zaworach energoelektrycznych powoduje skokowe zmiany prądu w zaworach, które na indukcyjnościach generują impulsy napięcia. Każda komutacja zaworu energoelektrycznego w falowniku generuje impulsy napięcia (impulsy Diraca), które powodują impulsowe zmiany pola elektrycznego w pojemnościach układu izolacyjnego. Na rysunku 1 przedstawiono wykres napięcia na układzie izolacyjnym transformator 670 [kVA], 6/0,59 [kV]. Transformator zasila, poprzez falownik, piec w odlewni. Falownik jednofazowy o napięciu i częstotliwości regulowanej w przedziale 70 ÷ 9600 Hz.

Właściwości materiałów izolacyjnych: przenikalność magnetyczna względna ϵ_r , $\text{tg}\delta$ i wytrzymałość dielektryczna na przebicie elektryczne, są funkcją temperatury, napięcia i częstotliwości zmiany natężenia pola elektrycznego. Izolacja

zwojowa uzwojeń transformatorów energetycznych standardowo jest papierowa, a uzwojenie jest w oleju.



Rys. 1. Przebieg napięcia zarejestrowany między fazami uzwojenia 590 V i kadzią transformatora olejowego o parametrach 670 kVA, 6/0,59 kV w czasie jednego okresu (20 ms [2])

Włókna celulozy są w oleju. Jest to układ izolacyjny szeregowo-równoległy. Parametry dielektryczne celulozy i oleju są różne, np. celuloza na $\text{tg}\delta = 0,03$, a olej transformatorowy ma $\text{tg}\delta = 0,001 \div 0,002$. Współczynnik strat dielektrycznych ($\text{tg}\delta$) papieru jest ponad 20 razy większy od ($\text{tg}\delta$) oleju mineralnego. Względna przenikalność elektryczna ϵ_r oleju mineralnego wynosi 2,2, a względna przenikalność elek-

tryczna papieru około 4. Im większa jest różnica względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r tym większa jest nierównomierność rozkładu natężenia pola elektrycznego w strukturze wewnętrznej izolacji. Energia ΔW piku napięciowego o wartości maksymalnej ΔU wynosi

$$\Delta W = \Delta U Q = (\Delta U)^2 C \quad (1)$$

Q – jest ładunkiem elektrycznym piku napięciowego w układzie izolacyjnym.

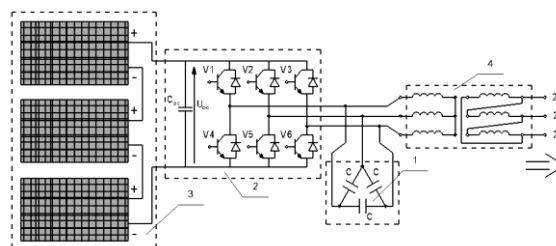
Pojemność jest proporcjonalna do ϵ_r . Mikro pojemność włókien celulozy jest dwa razy większa od pojemności oleju o tych samych wymiarach, W układzie równoległym energia ΔW przechodząca przez włókna celulozy jest dwa razy większa od energii przechodzącej przez olej. Parametry ϵ_r i $\text{tg}\delta$ oraz duża częstotliwość pików napięcia w układzie izolacyjnym wpływają na temperaturę włókien celulozy, a proces starzeniowy papieru w głównym stopniu zależy od temperatury. Z eksperymentu wiadomo, że wygrzanie nowego papieru w temperaturze 150°C przez 24 h powoduje utratę stopnia polimeryzacji ok. 50% w stosunku do wartości początkowej. Ma to negatywny wpływ na trwałość izolacji transformatora.

Układy izolacyjne uzwojeń transformatorów współpracujących z falownikami z modulacją szerokości impulsów MSI są narażone na udary napięciowe o częstotliwości impulsowania prostownika AC/DC i falownika DC/AC. Konstruktorzy falowników stosują coraz wyższe częstotliwości impulsowania, gdyż im większa jest częstotliwość impulsowania tym zawartość wyższych harmonicznych w napięciu i prądzie jest mniejsza i łatwiejsza do odfiltrowania. Częstotliwość impulsowania przy tranzystorach tradycyjnych wynosi kilka kHz, a przy tranzystorach SiC nawet kilkadziesiąt kHz. Dla układu izolacyjnego uzwojeń transformatora każdy impuls napięcia generuje dwa udary napięciowe o stromości $du/dt \sim 16 \cdot 10^2$ [V/ μs]. Udary napięciowe o dużej stromości, powtarzające się z częstotliwością impulsowania, powodują wyładowania koronowe (ang. *corona discharge*) przewodów uzwojenia, które skracają w sposób znaczący czas „życia” układu izolacyjnego transformatora. Znane są przypadki, że transformator olejowy już w okresie gwarancji ma układ izolacyjny zużyty, opisane to jest w literaturze [1] Transformatory olejowe współpracują z falownikami na farmach fotowoltaicznych, na farmach wiatrowych, w hydroelektrowniach,

w układach zasilających piece indukcyjne, w transformatorach rozdzielczych do stabilizacji napięcia i innych zastosowaniach. Firmy produkujące transformatory i firmy je instalujące, powinny stosować układy osłonowe dla izolacji transformatorów, które zmniejszałyby wartości pochodnych impulsów napięcia na układzie izolacyjnym uzwojeń transformatora generowanych przez falowniki MSI.

2. Ochrona układu izolacyjnego

Ochronę układu izolacyjnego transformatora zilustrujemy na przykładzie transformatora pracującego na farmie fotowoltaicznej – rys. 2. Bateria fotowoltaiczna wytwarza napięcie stałe, a falownik DC/AC przetwarza je na napięcie zmienne. Falownik jest połączony z transformatorem łączącym farmę z systemem elektroenergetycznym. Narażenia izolacji transformatora na przyspieszone starzenie pochodzą od falownika. Komutacja prądu w zaworach generuje w indukcyjnościach rozproszenia piki napięciowe na układzie izolacyjnym transformatora: izolacji zwojowej i izolacji głównej. Ochrona napięciowa transformatora powinna być skuteczna, to znaczy powinna je niwelować. Warunek ten spełniają kondensatory i warystory. Ochronę należy włączać na zaciski transformatora na które przyłączony jest falownik.



Rys. 2. Schemat farmy fotowoltaicznej z filtrem pojemnościowym na wejściu transformatora: 1 – ochrona kondensatorami C , 2 – falownik DC/AC, 3 – bateria fotowoltaiczna, 4 – transformator

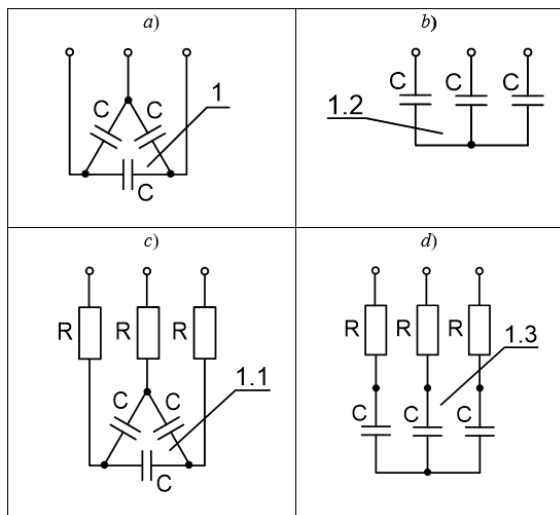
Na rysunku od fig. 3 przedstawiono warianty rozwiązania filtra pojemnościowego. Kondensatory mogą być połączone w trójkąt lub w gwiazdę. Napięcie na kondensatorach połączony w trójkąt wynosi

$$U_{C\Delta} = \sqrt{2}U + U_{pik} \quad (2)$$

U jest napięciem międzyfazowym falownika. Jeśli kondensatory są połączone w gwiazdę, to napięcie na kondensatorze wynosi

$$U_{CY} = \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3}} + U_{pik} \quad (3)$$

Kondensatory należy dobrać na napięcie $U_{C\Delta}$ lub U_{CY} .



Rys. 3. Układy filtru pojemnościowego połączonego: a) w trójkąt, b) w gwiazdę, c) w trójkąt plus rezystor, d) w gwiazdę plus rezystor

Przy napięciach sinusoidalnych, jeśli kondensatory kompensują tę samą moc bierną, to pojemności w układzie gwiazdy jest trzy razy większa

$$C_Y = 3C_{\Delta} \quad (4)$$

Dobierając pojemności filtru warunek ten można zachować, gdyż energia pików W_{pik} generowanych w układzie nie zależy od układu połączenia kondensatorów.

Wartość skokową prądu w filtrze pojemnościowym ogranicza się włączając szeregowo rezystory R w obwód kondensatorów.

Skuteczne zabezpieczenia transformatora realizuje się także warystorami. Idealna charakterystyka prądowo-napięciową warystora: 1) w zakresie napięcia ($0 \div [\pm U_{Nw}]$) rezystancja warystora $R = \infty$; 2) dla impulsu napięcia ($U > [\pm U_{Nw}]$) napięcie na warystorze jest stałe ($U = U_{Nw}$).

Charakterystykę napięciowo-prądową rzeczywistą warystora opisuje równanie

$$U = U_{Nw} \left(\frac{I}{I_{Nw}} \right)^{\beta} \quad (5)$$

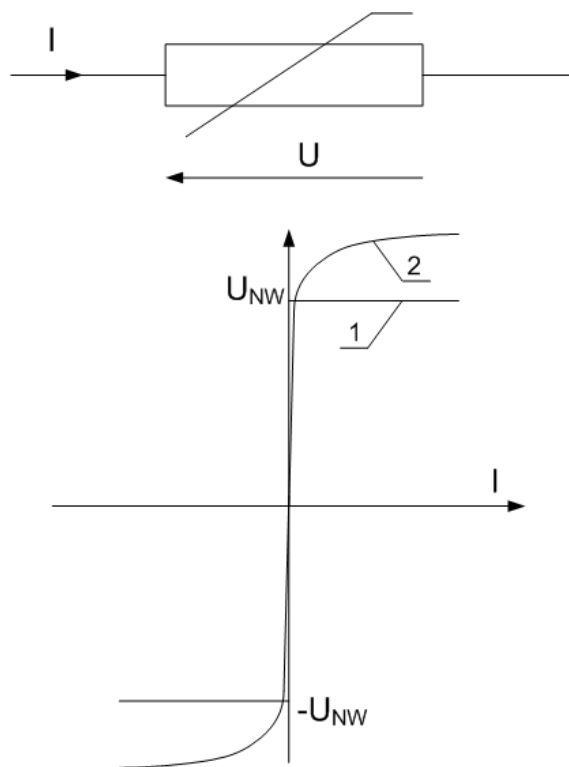
gdzie:

U_{Nw} i I_{Nw} są to napięcie i prąd załamania się charakterystyki warystora. Stała β jest współczynnikiem nieliniowości charakterystyki warystora

$$\beta \approx \frac{dU}{dI} \frac{I_{Nw}}{U_{Nw}} \quad (6)$$

Wykres charakterystyki prądowo – napięciowej warystora przedstawia rys. 4.

Im mniejsze jest $\beta < 1$ tym charakterystyka warystora jest korzystniejsza i zbliża się do charakterystyki idealnej, Dla impulsów napięcia $U > [\pm U_{Nw}]$ i $\beta = 0$ charakterystyka warystora jest idealna.



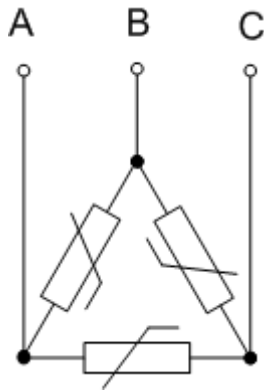
Rys. 4. Warystor: a) schemat, b) charakterystyka prądowa - napięciowa

Napięcie znamionowe warystora U_{Nw} należy dopasować do napięcia maksymalnego transformatora

$$U_{Nw} \geq \sqrt{2} U_N \left(1 + \frac{u_{reg\%}}{100} \right) \quad (7)$$

Gdzie: U_N jest napięciem znamionowym transformatora po stronie włączanego falownika, $u_{reg\%}$. Standardowo w transformatorach $u_{reg\%} = \pm 5\%$.

W układach 3. fazowych warystory należy łączyć w trójkąt – rys. 5



Rys. 5. Połączenie warystorów w układzie 3-fazowym

Energia wydzielana w warystorze

$$W_w = \int_0^{\infty} (u_w i_w) dt \quad (8)$$

W układzie 3. fazowym warystory wstępnie nagrzewają się mocą napięcia sinusoidalnego transformatora. Załóżmy napięcie transformatora znamionowe U_N oraz dla napięcia ($U_w \leq [\pm U_{Nw}]$) stałą wartość rezystancja warystora

$$R_w = \frac{U_{Nw}}{I_{Nw}} = \text{constans} \quad (9)$$

to moc rozpraszana na jednym warystorze

$$P_{w0} = U_N^2 / R_w \quad (10)$$

Do mocy P_{w0} dodaje się moc impulsów napięciowych na warystorze

$$P_{imp} = \sum_0^{\infty} \frac{1}{\Delta t} \int u_{imp} i_{imp} dt \quad (11)$$

gdzie Δt jest czasem trwania impulsu napięcia. Przy doborze warystorów należy zbilansować całkowitą moc rozpraszaną w warystorach. Każdy warystor nagrzewa energia

$$W_w = \int (P_{w0} + P_{imp}) dt \quad (12)$$

Ważna jest zatem energia pojedynczego impulsu jak i częstotliwość generacji impulsów napięcia.

3. Podsumowanie

Komutacja zaworów, w falownikach DC/AC i AC/DC/AC z modulacją szerokości impulsów MSI, odbywa się w mikrosekundach. W obwodach elektrycznych falowników są indukcyjności, powszechnie nazywane indukcyjnościami rozproszenia. Szybka zmiana prądu indukuje w tych indukcyjnościach impulsy napięcia, które oddziałują na układ izolacyjny uzwojenia transformatora współpracującego z falownikiem. Skuteczną ochronę izolacji uzwojeń transformatora przed przepięciami stanowią filtry tłumiące (obcinające) impulsy napięcia. Mogą to być kondensatory w różnych układach połączenia (rys. 3) bądź warystory w układzie połączenia w trójkąt (rys. 5). Filtr należy przyłączyć na zaciski transformatora do których jest przyłączony falownik. Poprzez dopasowanie napięcia znamionowego filtra i wielkości (mocy) filtra w sposób znaczący poprawi się warunki dielektryczne izolacji uzwojenia, proces starzenia izolacji będzie przebiegał wolniej i wydłuży się czas „życia” transformatora.

4. Literatura

- [1]. Bernatt J., Gawron ś., Glinka T., Pawłowski D., Olech W., Mních., Sobota J., Morawiec M., Porada M.: System ochrony układu izolacyjnego transformatora. *Patent Pat 241018*.
- [2]. Bernatt J., Gawron S., Glinka T., Polak A.: Diagnostyka on-line izolatorów przepustowych WN. *Energetyka ISSN 0013-7294*. Nr. 4/2022, s. 175-180.
- [3]. Bernatt J., Gawron S., Glinka T., Polak A.: Badania polaryzacyjne izolatora przepustowego typu OPI napięciem stałym. *Energetyka ISSN 0013-7294*. Nr. 6/2022, s. 231-235.
- [4]. Glinka T.: „Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka”. ISBN 978-83-931909-1-1. *Wydawnictwo Instytutu KOMEL*, 2015r.
- [5]. Jaworowska M.: Warystory. <https://elektronika2b.pl/technika/52145-warystory>.
- [6]. Kałużna U.: Kryteria wymiany transformatora na transformator nowy. *Napędy i Sterownice*. ISSN 1507-7764. Nr 6/2020, ss. 54-59.
- [7]. Wieczorek A.: Kondensatory. Zasady działania i zastosowanie. <https://botland.com.pl/blog/kondensatory>.