

ODDZIAŁYWANIE PRZEPIĘĆ ATMOSFERYCZNYCH NA BEZPIECZNIKI SN: BADANIA WSTĘPNE

Łukasz TŁUSTOCHOWICZ

Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
tel: 347 20 36, fax: 347 21 36, e-mail: l.tlustochowicz@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: Obserwowane są liczne przypadki błędnego działania w czasie burz bezpieczników SN chroniących transformatory słupowe SN/nn. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentów i symulacji wpływu przepięcia atmosferycznego na zachowanie się bezpieczników SN. Zauważono, że udary krótsze niż około 15 ms nie powodują znacznego zwiększenia całki Joule'a prądu płynącego przez bezpiecznik mogącego doprowadzić do jego zadziałania. Choć w rzeczywistości prądy piorunowe trwają znacznie krócej, to ze względu na częste wyładowania wielokrotne efekt dość długiego, zastępczego impulsu nie jest nieuzasadniony. Wyniki eksperymentu laboratoryjnego i symulacji dla transformatora 3-fazowego potwierdzają możliwość nieprawidłowego działania bezpieczników w czasie burz, rejestrowanego w praktyce i potwierzonego badaniami dla transformatorów 1-fazowych.

Słowa kluczowe: przepięcie atmosferyczne, bezpieczniki SN, transformator, ogranicznik przepięć

1. WPROWADZENIE

Przepięcia atmosferyczne, dochodzące do transformatora są ucinane przez ochronniki na poziomie ochrony. Założono, że czas zadziałania ochronnika jest znacznie krótszy od czasu trwania impulsu przepięcia. W zależności od tego iloma przewodami przychodzi przepięcie i jak są skojarzone uzwojenia transformatora może krótkotrwale wzrosnąć znacząco prąd magnesujący [1]. Gdy całka Joule'a tego prądu osiągnie wartość określoną przez Mayra (1) nastąpi zadziałanie bezpiecznika.

$$\int_0^{t_p} i^2 dt = K_M S_z^2 \quad (1)$$

gdzie: K_M – stała Mayra, S_z – przekrój zwarciový topika, t_p – czas przedłukowy.

Działanie to jest niepoprawne, gdyż nie wywołuje go zwarcie w obwodzie chronionym przez bezpiecznik.

Względnie łatwy do analizy jest układ trzech transformatorów jednofazowych stosowany w praktyce amerykańskiej. W literaturze można znaleźć wyniki takich badań, np. [1]. Znacznie trudniejszy jest przypadek, gdy ma się do czynienia z transformatorem trójfazowym. Wystąpienie we wszystkich fazach (lub tylko niektórych) składowych na-

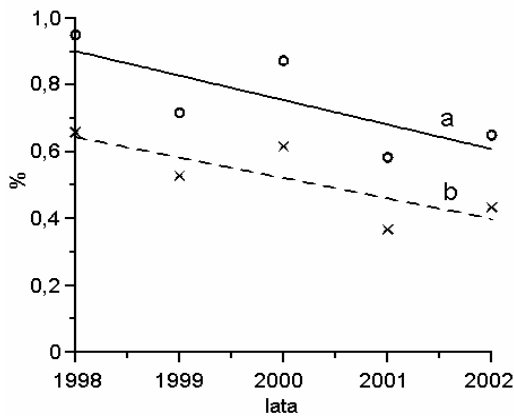
pięć o tej samej biegunowości wymusza wystąpienie w rdzeniu odpowiadających im składowych strumienia, zależnych od konstrukcji rdzenia, sposobu skojarzenia uzwojeń oraz liczby przewodów, którymi przychodzi przepięcie. Zadanie staje się dość trudne, jeśli weźmie się dodatkowo pod uwagę nieliniowe własności rdzenia w czasie szybkich zmian strumienia. W badaniach przedstawionych poniżej, próbuje się ocenić, jak długi musi być udar, aby mogło dojść do zadziałania bezpiecznika instalowanego przed transformatorem trójfazowym. Skoncentrowano się na dość prostym przypadku przepięcia w jednej tylko fazie, gdy do transformatora z uzwojeniami skojarzonymi Y/y z niezziemionym punktem zerowym dochodzi jedna fala przepięcia. Jest to możliwe przy niewielkim prądzie piorunowym. Tak się jednak składa, że właśnie niewielkie prądy pioruna trwają najdłużej i dlatego w większym stopniu wpływają na stan magnetyczny rdzenia, a tym samym na prąd pobierany przez transformator z sieci, płynący przez bezpieczniki.

W wielu sieciach SN usuwa się bezpieczniki przed transformatorami uzasadniając to wzrostem jakości transformatorów i zmniejszeniem się liczby ich uszkodzeń.

W rozumowaniu takim nie bierze się pod uwagę zagrożenia dla środowiska, pojawiającego się w przypadku wystąpienia zwarcia wewnętrznego w transformatorze i potencjalnej eksplozji kadzi. Groźba taka zawsze będzie istniała nawet przy istotnym wzroście niezawodności transformatorów. Dlatego warto inwestować w niezbyt przeciętne drogie bezpieczniki, aby zapowiedz możliwej katastrofie ekologicznej. W niektórych krajach instaluje się, więc ponownie bezpieczniki, nawet te wcześniej usunięte. Chociaż w Polsce widoczne jest zmniejszenie się awaryjności transformatorów (rys. 1), to warto brać pod uwagę pozostawienie bezpieczników SN.

Przed kilkoma laty Hycza [2] próbował powiązać działanie bezpieczników SN z wystąpieniem burzy na podstawie analizy raportów energetyki dotyczących ich wymiany i uszkodzeń transformatorów SN/nn oraz danych meteorologicznych. Choć stworzył obszerną bazę opartą o dane z zakładów Polski północnej, to ze względu na niewystarczającą do analizy szczegółowość raportów wnioski te mogą być obarczone dużymi błędami. Ossowski [3] uważa jednak, że podstawowym problemem jest coś innego, a mianowicie nieprawidłowa koordynacja zabezpieczeń

SN/nn, co powoduje działanie bezpieczników SN, także w czasie zwarć po stronie nn.



Rys. 1. Awaryjność transformatorów SN/nn małych mocy w kilku polskich zakładach energetycznych: a) wszystkie awarie, b) awarie uzwojeń oraz te wywołane burzami [4]

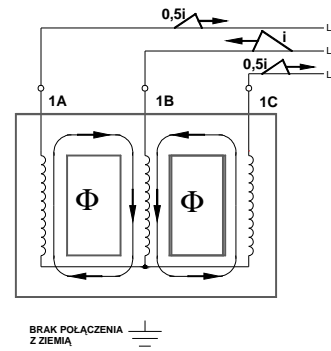
2. BEZPIECZNIKI W STACJACH SN/nn

Najlepiej poznanym i opisanym jest przypadek działania bezpieczników SN w układach jednofazowych, typowych dla sieci amerykańskich. Blisko dwadzieścia lat temu mechanizm ten próbowano wyjaśnić w Kanadzie (A. Hamel, St. Jean oraz M. Paquette) [1]. Wywołany przepięciem atmosferycznym prąd, płynąc przez uzwojenie generuje strumień magnetyczny zamykający się w rdzeniu transformatora, powodując jego znaczne nasycenie, szczególnie wówczas, gdy strumień związany z przepięciem ma kierunek zgodny ze strumieniem związanym z napięciem sieci. Skutkuje to gwałtownym, krótkotrwałym powiększeniem się prądu magnesującego. Jeżeli jego całka Joule'a przekroczy wartość określoną w (1), to bezpiecznik musi zadziałać.

Stosując transformatory jednofazowe rozkład fal przepięciowych w przewodach linii energetycznej nie ma większego znaczenia (fale przychodzą jednym, dwoma, czy trzema przewodami), w przeciwieństwie do systemów z transformatorami trójfazowymi.

Zdecydowana większość przepięć atmosferycznych wywołuje fale we wszystkich przewodach linii. Wynika to z małych odległości pomiędzy przewodami roboczymi i występującymi przeskokami [4]. Punkt neutralny uzwojeń transformatora staje się miejscem spotkania i odbicia tych fal. Ponieważ są one współbieżne, wywołany przez nie strumień może się zamknąć jedynie przez powietrze. W tych warunkach nie należy oczekiwać nagłego wzrostu prądu magnesującego, do poziomu zagrażającego bezpiecznikom SN [4].

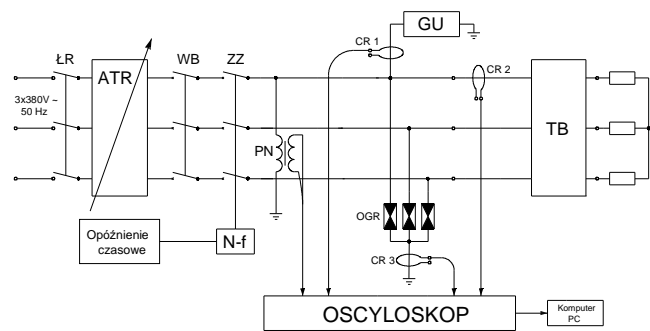
Do analizy działania bezpieczników w układzie z transformatorem trójfazowym wybrano przypadek z niewielkimi prądami piorunowymi, gdy przepięcie występuje tylko w jednej fazie (rys. 2). Model taki ułatwia wykonanie eksperymentu.



Rys. 2. Rozpylenie strumienia w 3-fazowym rdzeniu wywołany przepięciem

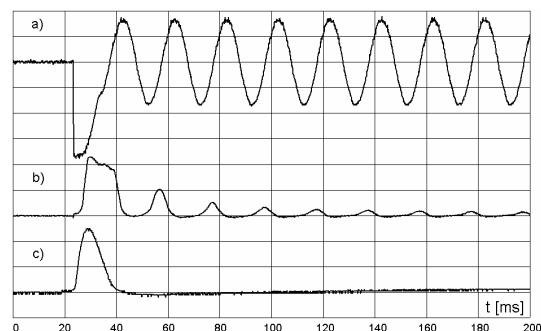
3. BADANIA LABORATORYJNE

Oddziaływanie przepięć na bezpieczniki sprawdzono doświadczalnie, z wykorzystaniem trójfazowego transformatora o mocy 2 kV·A oraz napięciach: pierwotnym 380 V i wtórnym 37 V. Schemat układu probierczego pokazano na rysunku 3.



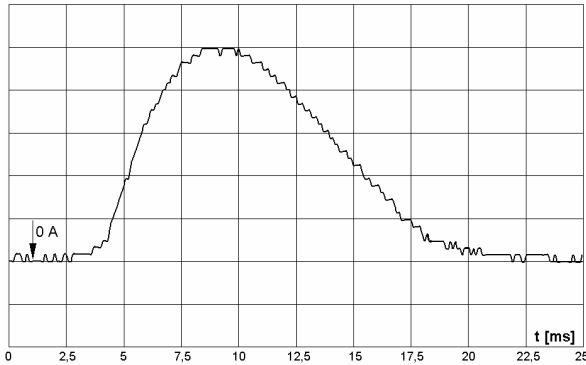
Rys. 3. Układ probierczy: LR– łącznik roboczy, WB– wyłącznik bezpieczeństwa, ZZ– załącznik zwarciowy, N-f– nastawnik fazowy, ATR– autotransformator, GU– generator udarów, TB– transformator badany, OGR– ogranicznik, PN– przekładnik napięciowy, CR– cewka Rogowskiego

Stronę górnego napięcia transformatora chroniono od przepięć ogranicznikami połączonymi w gwiazdę uziemioną. Obciążenie strony wtórnej stanowiły rezystory skojarzone w gwiazdę (rys. 3), dobrane w ten sposób, aby w uzwojeniach transformatora popłynęły prądy znamionowe.



Rys. 4. Rozpylenie napięć i prądów dla przepięcia w jednej fazie trwającego około 15 ms: a) napięcie w fazie transformatora z udarem ($k= 200 \text{ V/dz.}$), b) prąd w bezpieczniku ($k= 50 \text{ A/dz.}$), c) prąd udaru ($k= 50 \text{ A/dz.}$)

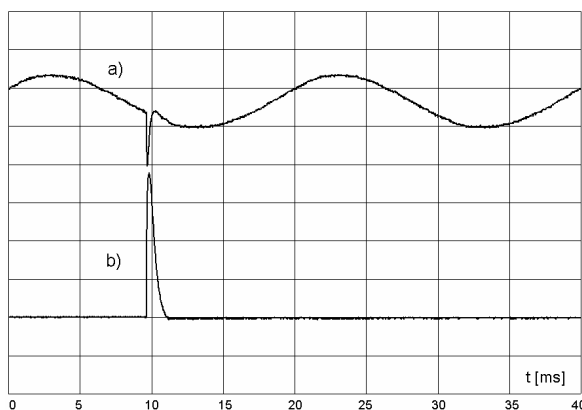
W badaniach stosowano długie impulsy prądowe, nawet w niektórych przypadkach porównywalne z półokresem 50 Hz. Wytwarzano je ładując kondensatory o pojemności 2 mF do napięcia 750 V. Długość impulsu regulowano indukcyjnością dławika. Przykładowy oscylogram takiego udaru pokazano na rysunku 5. Poszukiwano impulsu mogącego wywołać wzrost prądu w bezpieczniku umożliwiając jego zadziałanie.



Rys. 5. Kształt udaru prądowego stosowanego w badaniach, ($k=40$ A/dz.)

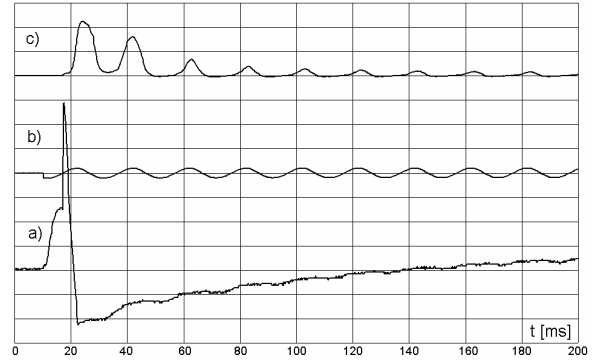
Badano, dla jakich parametrów (amplituda oraz czas trwania) efekt podmagnesowania rdzenia był zauważalny. Impulsy krótkie nie powodowały istotnych zmian w prądzie magnesującym transformatora, a tym samym prądzie bezpiecznika (rys. 7). Dopiero impulsy o czasach trwania dłuższych od 15 ms wpływały w sposób widoczny na podmagnesowanie rdzenia (rys. 7c). Przypuszczalnie, do wytworzenia podobnego zjawiska w transformatorze energetycznym potrzebne będą impulsy prądowe o jeszcze dłuższych czasach.

W eksperymencie na badany transformator dołączano generator, a potem sieć zasilającą. W trakcie badań wstępnych stwierdzono, że efekt podmagnesowania rdzenia jest największy w momencie załączenia transformatora w maksimum prądu udaru.



Rys. 6. Przepięcie w jednej fazie o czasie trwania około 1 ms: a) prąd w bezpieczniku ($k=2,5$ A/dz.), b) prąd udaru ($k=50$ A/dz.)

Zaobserwowano wzrost prądu magnesującego transformatora pod wpływem impulsu o czasie trwania, powyżej 15 ms. Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi prądów w bezpieczniku: bez (a) oraz z wyraźnym wpływem udaru (b).



Rys. 7. Wpływ przepięcia na prąd w bezpieczniku: a) prąd udaru ($k=50$ A/dz.), b) ustalony prąd w bezpieczniku ($k=10$ A/dz.), c) prąd w bezpieczniku z widocznym wpływem przepięcia ($k=50$ A/dz.)

Oszacowano całkę Joule'a prądu bezpiecznika (rys. 7c), która jest miarą energii wydzielonej w obwodzie, a tym samym zagrożeniem dla bezpiecznika. W rozpatrywanym przypadku całka była równa około $470 \text{ A}^2\text{s}$. Obliczono ją dla pierwszych trzech amplitud przebiegu (50 ms). Uwzględnienie kolejnych amplitud nie wpływało znacząco na wynik. Całka Joule'a wynikająca z prądu znamionowego i prądu impulsu o czasie trwania około 1 ms (rys. 6a) była równa zaledwie $0,2 \text{ A}^2\text{s}$.

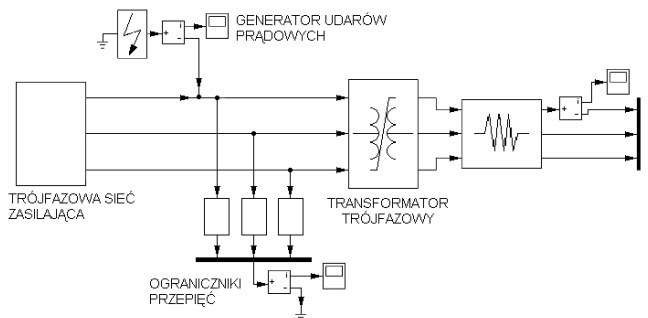
4. BADANIA SYMULACYJNE

Badania symulacyjne miały na celu określenie możliwego zakresu zmian prądu bezpiecznika w warunkach pracy zbliżonych do burzy.

4.1. Założenia do obliczeń

Wykorzystano klasyczny model transformatora trójfazowego o schemacie zastępczym typu T dostępny w bibliotece środowiska programu Matlab/Simulink. Uproszczony schemat obwodu zastosowanego w symulacji przedstawiono na rysunku 8.

Jedną ze skrajnych faz w modelu obciążano impulsem udarowym z generatora (rys. 9) obserwując zmiany prądu magnesującego transformatora.



Rys. 8. Schemat obwodu do symulacji

Parametrami opisującymi zastosowany model transformatora są rezystancje oraz indukcyjności uzwojeń: pierwotnego (R_1, L_1) i wtórnego (R_2, L_2) oraz gałęzi magne-

sującej (R_m, L_m), przedstawione w jednostkach względnych. Należy uwzględnić również moc znamionową S_n , częstotliwość pracy f_n oraz napięcia strony pierwotnej U_{1n} i wtórnej U_{2n} transformatora. Rezystancje oraz indukcyjności obliczono korzystając z zależności:

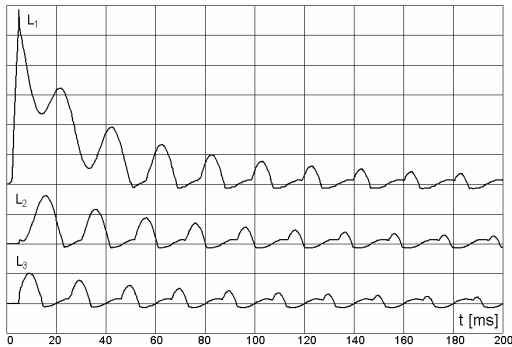
$$R(p.u.) = \frac{R(\Omega)}{Z_{base}} \quad (2)$$

$$Z_{base} = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3)$$

$$L(p.u.) = \frac{L(H)}{L_{base}} \quad (4)$$

$$L_{base} = \frac{Z_{base}}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \quad (5)$$

gdzie: $R(\Omega)$, $L(H)$ – wielkości wyznaczone eksperymentalnie dla transformatora rzeczywistego.



Rys. 9. Obliczone prądy transformatora Y_n zaburzone przez przebieg w jednej fazie ($k= 10$ A/dz.), L_1, L_2, L_3 – fazy trójfazowej sieci zasilającej

5. WNIOSKI

Badania eksperymentalne i symulacyjne wpływu przebiegów atmosferycznych na bezpieczniki SN pozwalają przewidzieć warunki i stopień ich zagrożenia.

Analiza wyników pomiarów i obliczeń prowadzi do wniosku, że proste symulacje obarczone są sporymi błędami. Zależy to m. in. od rodzaju stosowanego modelu transformatora, który musi uwzględniać zmianę własności magnetycznych rdzenia. Wyniki eksperymentu i symulacji pokazują radykalny wzrost prądu bezpiecznika wywołany przebiegiem trwającym, co najmniej 15 ms. Dla bezpieczników o małych prądach znamionowych wartość ta może stwarzać zagrożenie.

Wyniki badań symulacyjnych mogą być pomocne w ocenie przyczyn działania bezpieczników SN w czasie burzy oraz ich doborze, celem zapobiegania nieuzasadnionemu działaniu.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Hamel A., St.-Jean G., Paquette M.: Nuisance fuse operation on MV transformer during storm, IEEE Transaction on Power Delivery 1990, ISSN 0885-8977
2. Hycza P., Analiza nieuzasadnionego działania bezpieczników WN w stacjach transformatorowych, praca magisterska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Gdańsk 2003
3. Ossowicki J., Szablewski K., Joeck R.: Zabezpieczenie słupowych i wewnętrznych stacji transformatorowych małej mocy, Elektroinstalator 5/2004
4. Tlustochowicz Ł.: Zagrożenia od przebiegów atmosferycznych dla bezpieczników SN chroniących transformatory słupowe, Konferencja Transformatory 2005, Bydgoszcz 2005

EFFECT OF ATMOSPHERIC OVERVOLTAGES ON MV FUSES: PRELIMINARY RESEARCH

In the literature, frequent nuisance operation during storm of fuses protecting MV/LV pole-mounted transformers has been reported. In the paper results of experiments and numerical simulations dealing with the effect of atmospheric overvoltages on MV fuse operation has been presented. It has been found, that impulses shorter than 15 milliseconds are unable to enforce the dynamic increase of the fuse-through current sufficient for the fuse operation. Although, in practice lightning current impulses are significantly shorter, a great number of discharges consist of multiple strokes. So, the consideration of relatively long substitute impulse can be justified. The results of experiments and numerical simulations carried out for three-phase transformer confirm the possibility of nuisance fuse operation during storms noted in practice and confirmed by Canadians investigating the system based upon a single-phase transformers.