

Leonid Wikientiewicz BAGINSKIJ

Nowosybirski Instytut Lektrotechniczny
Katedra Elektrowni

ANALIZA SYGNAŁÓW WEJŚCIOWYCH ZABEZPIECZEŃ RÓŻNICOWYCH
I PORÓWNAWCZO-FAZOWYCH OBIEKTÓW SKUPIONYCH
PRZY GŁĘBOKICH NASYCENIACH PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę sygnałów wejściowych zabezpieczeń różnicowych i porównawczo-fazowych obiektów skupionych przy głębokich nasyceniach przekładników prądowych. Zaproponowano zastosowanie maszyn cyfrowych do analizy tych sygnałów przy jednoczesnej aproksymacji krzywej magnesowania przekładników za pomocą charakterystyki prostokątnej. Przedstawiono model matematyczny przekładnika prądowego.

1. WPROWADZENIE

Zniekształcenia prądów wtórnych, spowodowane nasyceniem rdzeni przekładników prądowych w stanach nieustalonych w zasadniczy sposób wpływają na działanie zabezpieczeń różnicowych i porównawczo-fazowych. Aby ocenić wpływ stanów nieustalonych w przekładnikach prądowych na działanie rozpatrywanych zabezpieczeń, należy rozpatrzyć wpływ różnych czynników na zniekształcenia sygnałów wejściowych. W tym celu należy przeprowadzić analizę jakościową zależności sygnałów wejściowych od czynników wpływających na ich zniekształcenie. Temu zagadnieniu poświęcono już wiele prac (np. [1-7] i inne).

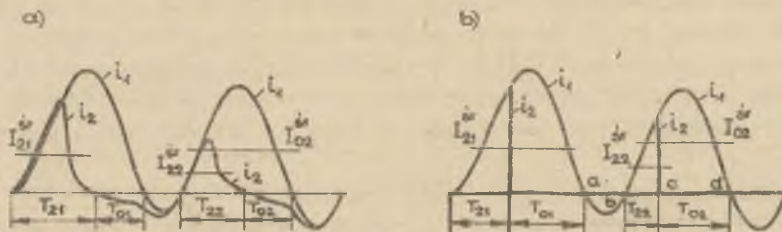
Najbardziej wiarygodne wyniki daje zastosowanie maszyn cyfrowych (np. [7]). Jednak dokładność obliczeń i związane z nią metody w wielu przypadkach nie mogą być z pożytkiem wykorzystane z uwagi na małą dokładność oszacowania danych wejściowych, szczególnie parametrów charakterystyki magnesowania. Dlatego też obok metod złożonych i dokładnych, w rozwiązaniu analizowanego problemu konieczne wydaje się zastosowanie metod prostszych. Ponieważ w niniejszej pracy rozpatruje się stany nieustalone tylko przy głębokich nasyceniach przekładników prądowych, właściwym rozwiązaniem jest aproksymacja krzywej magnesowania przekładników za pomocą charakterystyki prostokątnej [2,5,6]. Należy tu zauważyć, że możliwości jakie daje aproksymacja krzywych magnesowania charakterystyką prostokątną są nie w pełni wykorzystane. W artykule [6] poświęconym bezpośrednio opracowaniu szybkich metod obliczeniowych do analizy sygnałów wejściowych zabezpieczenia przy czynnym obciążeniu przekładników prądowych parametry tych sygna-

łów przedstawiono w postaci rodziny krzywych opracowanych dla drugiego i następnych okresów stanu przejściowego przy maksymalnym udziale składowej nieokresowej. Jednakże prawdopodobieństwo maksymalnego udziału składowej nieokresowej w prądzie zwarciovym jest niewielkie [8], a przedstawione w postaci rodziny krzywych zależności nie umożliwiają przeprowadzenia oceny wpływu poszczególnych czynników na sygnały wejściowe zabezpieczenia.

Celem niniejszej pracy jest określenie zależności sygnałów wejściowych rozpatrywanych zabezpieczeń od parametrów prądu pierwotnego i obwodów wtórnych oraz analiza ogólna przeprowadzona na podstawie tych zależności. Żąda się przy tym, aby wyniki analizy jakościowej posiadały dostatecznie prostą postać, aby mogły być wykorzystane do obliczeń w praktyce inżynierskiej.

2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA

Objektami skupionymi, dla których stosuje się zabezpieczenia różnicowe i porównawczo-fazowe są podstawowe elementy stacji i elektrowni, tj.: szyny zbiorcze, transformatory, generatory i silniki synchroniczne. Uwzględniają, że w warunkach rzeczywistych przy zwarcioach w pobliżu tych obiektów stałe czasowe składowych nieokresowych $T_a \geq 0,15$ s, a obciążenie przekładników prądowych ma charakter praktycznie czynny, analizę ograniczono jedynie do rozpatrzenia stanów przejściowych przy tych założeniach.



Rys. 1. Przebiegi prądowe początkowego etapu stanu przejściowego w przekładniku prądowym

a - o charakterystyce rzeczywistej, b - o charakterystyce prostokątnej

Na rys. 1 przedstawiono przebiegi początkowego etapu stanu przejściowego w przekładniku prądowym o obciążeniu czynnym przy początkowym kącie zwarcia $\alpha = 0$. W charakterze sygnałów zabezpieczenia różnicowego przy zwarcioach wewnętrznych (w niniejszej pracy) przyjmuje się średnie wyprostowane wartości prądu wtórnego za okres, tj. I_{2n}^{kr} (gdzie: n - numer okresu), a przy zwarcioach zewnętrznych I_{on}^{kr} (sygnał użyteczny, tj. maksymalnie możliwy prąd różnicowy). W charakterze sygnału wejściowego zabezpieczenia porównawczo-fazowego przyjmuje się czas występowania sygnału wtórnego T_{2n}

przy zadanym poziomie formowania. Wtedy sygnał użyteczny określa się jako: $T_{on} = T_{1n} - T_{2n}$; gdzie T_{1n} - czas występowania odpowiedniej półfali prądu pierwotnego. Na rys. 1 wielkości te dla pierwszego okresu oznaczono odpowiednio I_{21}^{sr} , I_{01}^{sr} , T_{21} , T_{01} , a dla drugiego okresu - I_{22}^{sr} , I_{02}^{sr} , T_{22} , T_{02} , przy czym przyjęto, że poziom formowania sygnału zabezpieczenia porównawczo-fazowego jest dużo mniejszy od amplitudy prądu pierwotnego I_{1M} . W przypadku gdy obydwie wielkości są porównywalne, T_{2n} należy zmniejszyć o czas narastania sygnału do takiego poziomu formowania, który można bezpośrednio określić z równania prądu pierwotnego.

Ponadto, w modelu matematycznym stanu przejściowego przyjęto następujące założenia:

- a) Prąd pierwotny przyjęto jako przebieg złożony ze składowej okresowej sinusoidalnie zmiennej o częstotliwości podstawowej i składowej aperiodycznej.
- b) Prąd pierwotny przed zwarcie przyjęto równy zero.
- c) Składową aperiodyczną prądu pierwotnego w czasie, w którym występuje prąd wtórny przyjęto jako przebieg nietłumiony (przedziały T_{21} i T_{22} na rys. 1b). Założenia tego nie wykorzystuje się przy analizie sygnału użytecznego I_{on}^{sr} .

3. MODEL MATEMATYCZNY I WARUNKI NASYCENIA PRZEKŁADNIKA PRĄDOWEGO

Model matematyczny przekładnika prądowego przy przyjętych założeniach można zapisać za pomocą równań:

$$i_1 = i_0 + i_2 \quad (1)$$

$$\psi = \psi_r + R \int_0^t i_2 dt \quad (2)$$

$$i_0 = \begin{cases} 0, & \text{jeżeli } \psi \leq \psi_s \\ i_1, & \text{jeżeli } \psi > \psi_s \end{cases} \quad (3)$$

$$i_1 = I_{1M} \left[-\cos(\omega t + \alpha) + \cos \alpha \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \right], \quad (4)$$

w których:

i_0, i_1, i_2 - wartości chwilowe prądów: magnesującego, pierwotnego i wtórnego,

ψ_r, ψ_s, ψ - strumienie: resztkowy, nasycenia i chwilowy,

R - rezystancja obwodu wtórnego przekładnika.

Ponieważ przy przyjętych założeniach stan nieustalony wnosi zniekształcenia sygnałów wejściowych zabezpieczeń tylko przy nasyceniu przekładników prądowych, należy określić numer okresu, w którym to nasycenie wystąpi po raz pierwszy, tj. okres pierwszego nasycenia. Rozwiązując równania (1) ÷ (4) i oznaczając

$$\Delta V_s = \frac{\psi - \psi_r}{V_s}$$

otrzymuje się (uwzględniając tłumienie składowej aperiodycznej):

$$\Delta V_s = \frac{1}{A_z} \left\{ \sin \alpha - \sin(\omega t_a + \alpha) + \omega T_a \cos \alpha \left[1 - \exp\left(-\frac{t_a}{T_a}\right) \right] \right\} \quad (5)$$

W równaniu tym t_a oznacza czas od początku stanu nieustalonego do chwili, w której znak prądu pierwotnego w przekładniku o charakterystyce prostokątnej zmienia się od zgodnego ze znakiem składowej aperiodycznej do przeciwnego (p. rys. 1b). Czas ten określa się z równania (4) przy $i_a = 0$. Współczynnik $A_z = \frac{\omega \psi_s}{I_{1M} R}$ występujący w równaniu (5) jest uogólnionym parametrem [5].

Wielkość $\Delta V_{s, w}$ równania (5) należy wyznaczyć, przyjmując najpierw t_a dla okresu pierwszego, a następnie dla kolejnych okresów dopóki nie będzie spełniona zależność: $\Delta V_s \geq \Delta V_{s, w}$. Okres ten będzie okresem pierwszego nasycenia. Warunek nasycenia przekładnika prądowego w pierwszym okresie przy $T_a \geq 0,2$ s może być wyznaczony orientacyjnie przy założeniu braku tłumienia składowej nieokresowej na podstawie zależności:

$$\Delta V_{s, w} \leq \frac{2}{\omega} [\sin \alpha + (\pi - \alpha) \cos \alpha] \quad (6)$$

Zależność ta daje nieco zawyżone wyniki przy $\alpha = 0$ (do 20%), lecz przy $\alpha \geq 30^\circ$ błąd nie przekracza 3%.

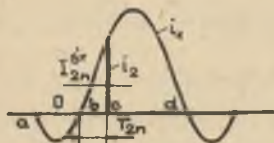
W rozpatrywanym przypadku, przy stosunkowo dużej zawartości składowej nieokresowej w prądzie zwarciovym ($\alpha \leq 60^\circ$), maksymalne nasycenie przekładnika prądowego wystąpi w okresie, bezpośrednio po okresie pierwszego nasycenia. Na rys. 2 przedstawiono oscylogram prądu w okresie maksymalnego nasycenia przy przyjętych wcześniej założeniach, przy czym składową nieokresową prądu pierwotnego przyjęto tu równą:

$$i_a = i_a(t_b) = I_{1M} \cos \alpha G,$$

gdzie:

$$G = \exp\left(-\frac{t_b}{T_a}\right).$$

Rys. 2. Przebiegi prądowe początkowego etapu stanu przejściowego w przekładniku prądowym o charakterystyce prostokątnej



Z równań (1) ÷ (3) wynika, że w okresie pierwszego maksymalnego nasycenia oraz w następnych, w których występuje głębokie nasycenie, spełniona jest równość:

$$\Delta \Psi_{bo} = -\Delta \Psi_{ab}, \quad (7)$$

(p. rys. 2), przy czym w całym przedziale t_{ab} transformacja jest "idealna".

Wykorzystując równość (7) oraz uwzględniając, że

$$G \cos \alpha = \cos(\omega t_b + \alpha) = \cos \omega t_{ob} \quad (8)$$

łatwo otrzymać wzory, które przedstawiono w wierszach 1 i 2 tabelicy 1. W dalszych rozważaniach wzory zamieszczone w tej tabelicy będą oznaczane indeksami odpowiadającymi danemu wierszowi i kolumnie.

Tabelica 1

Zestawienie zależności opisujących sygnały wejściowe zabezpieczenia różnicowego i porównawczo-fazowego w stanach nieustalonych

Nr wzoru	a) Zabezpieczenie różnicowe	b) Zabezpieczenie porównawczo-fazowe
1	$I_{2n}^{sr} = I_1^{sr} (\sin \omega t_{ob} - \omega t_{ob} G \cos \alpha)$	$T_{21} = \frac{1}{\omega} \sqrt{1 - \left(\frac{2\omega t_{ob} G \cos \alpha}{\sin \omega t_{ob}} - 1 \right)^2}$
2	$I_{22}^{sr} = I_1^{sr} \sqrt{1 - \cos^2 \alpha G^2} (1 - G \cos \alpha)$	$T_{22} = \frac{2}{\omega} \sqrt{G \cos \alpha (1 - G \cos \alpha)}$
3	$I_{0n} = \frac{I_{1M} \cdot T_a \cos \alpha}{T} \left[\exp\left(-\frac{t_a}{T}\right) - \exp\left(-\frac{t_b}{T}\right) \right]$	$T_{0n} = t_{bd} - T_{2n}$
4	$I_{02}^{sr} = I_{1M} \cos \alpha \exp\left(-\frac{t_b}{T_a}\right)$	$T_{02} = t_{bd} - T_{22}$
5	$I_{21}^{sr} = \frac{I_1^{sr}}{2} \left(\frac{\Delta Y_{S*} A_z}{2} + \sin \omega t_{ob} + \right. \\ \left. - \omega t_{ob} \cos \alpha G \right)$	$T_{21} = \frac{2}{\omega} \sqrt{\Delta Y_{S*} A_z}$
6	—	$T_{21} = \frac{1}{\omega} \sqrt{2 \cdot \Delta Y_{S*} A_z}$

4. ANALIZA PRZYDATNOŚCI WZORÓW Z TABLICY 1

Wzór (1a) - w którym I_1^{sr} oznacza wartość średnią składowej okresowej prądu pierwotnego - potwierdza fakt, że maksymalne zniekształcenie prądu wtórnego przy występowaniu składowej aperiodycznej nie zależy od strumienia resztkowego ψ_r i rezystancji obciążenia R , natomiast zależy od prądu pierwotnego i zawartości składowej w rozpatrywanym okresie. Przy $T_a \geq 0,15$ s niedokładność obliczenia prądu I_{2n}^{sr} wskutek pominięcia tłumienia składowej nieokresowej nie przekracza (7-10%). Wzór (1a) może być stosowany dla dowolnego okresu głębokiego nasycenia po pierwszym okresie nasycenia maksymalnego. Jednakże korzystanie z niego jest utrudnione ze względu na konieczność uprzedniego określenia wartości ωt_{ob} z równania (4). Jeżeli pierwsze maksymalne nasycenie występuje w drugim okresie i $\alpha \leq 50^\circ$, to można korzystać ze wzoru (2a), który daje wyniki zawyżone do ok. 20% w porównaniu z wartościami I_{2n}^{sr} określonymi przy uwzględnieniu tłumienia składowej nieokresowej.

Wzór (3a) wyprowadzony jest dla obciążenia sygnału użytecznego w zabezpieczeniu różnicowym, dla $T = 0,02$ s z uwzględnieniem tłumienia przy jednym założeniu, że

$$\frac{1}{\omega} [\sin(\omega t_a + \alpha) - \sin(\omega t_d + \alpha)] \approx 0,$$

Założenie to jest słuszne, ponieważ przy $T_a \geq 0,15$ s t_d prawie nie różni się od $t_a + T$, tj. praktycznie $t_{\text{ad}} = T$ (p. rys.2), a $\cos \alpha T_a \approx \frac{1}{\omega}$. Warto tu zauważyć, że prawa strona wzoru (3a) odpowiada praktycznie średniej wartości składowej aperiodycznej prądu zwarciovego za okres t_{ad} . Z uwzględnieniem poprzednio przyjętych założeń wzór ten przyjmuje postać (4a). Tak więc wartość średnia maksymalnego sygnału użytecznego jest praktycznie równa średniej wartości składowej aperiodycznej prądu zwarciovego i nie zależy od obciążenia oraz od strumienia resztkowego.

Wszystkie wzory opisujące sygnały wejściowe zabezpieczenia porównawczo-fazowego wyprowadzono przy założeniu, że $\sin \omega T_{2n} = \omega T_{2n}$. Ze wzoru (1b) wynika, że sygnał wejściowy w okresie pierwszego maksymalnego nasycenia nie zależy od wielkości R , ψ_r i I_{1M} . Wzór ten może być zastosowany dla dowolnego okresu stanu przejściowego, występującego po okresie pierwszego maksymalnego nasycenia, jeżeli dopuszczalne jest założenie $\sin \omega T_{2n} = \omega T_{2n}$. Wzór (2b) może być zastosowany tylko dla drugiego okresu, jeśli okres ten jest okresem pierwszego maksymalnego nasycenia.

W większości przypadków stopień zniekształcenia sygnału w okresie pierwszego maksymalnego nasycenia nie ma istotnego znaczenia z punktu widzenia prawidłowości działania rozpatrywanych zabezpieczeń. Istnieją jednak przypadki, w których zwarcio wewnętrznemu towarzyszy przepływ prądu znacznie przekraczający prąd zwarcia zewnętrznego (np. w zabezpieczeniach transformatorów lub bloków generator-transformator). Ponadto strumień resztko-

wy może okazać się tu dodatkowym, niesprzyjającym zjawiskiem. Wtedy zniekształcenie sygnału w pierwszym okresie może być na tyle duże, że sygnał wejściowy o niedostatecznej wartości nie doprowadzi do rozruchu zabezpieczenia. Wskutek tego w okresie pierwszego maksymalnego nasycenia zniekształcenie to będzie jeszcze większe. Występuje zatem opóźnienie w zadziałaniu zabezpieczenia, które może trwać kilka okresów. W związku z tym zachodzi potrzeba przeprowadzenia szacunkowej oceny wartości sygnału w pierwszym okresie, jeśli okres ten jest okresem pierwszego maksymalnego nasycenia. Wzór (5a) umożliwia przeprowadzenie takiej oceny dla zabezpieczenia różnicowego. Wynika z niej, że prąd I_{21}^{sr} zależy nie tylko od wartości prądu pierwotnego i zawartości składowej nieokresowej, lecz także od obciążenia przekładnika prądowego i strumienia resztkowego.

Wzorów umożliwiających określenie wartości sygnału wejściowego zabezpieczenia porównawczo-fazowego w pierwszym okresie (jeśli jest to okres pierwszego nasycenia) dla dowolnych wartości α nie udało się wyprowadzić. Otrzymano jedynie wzory dla przypadków szczególnych. Równania (5b) i (6b) są wiarygodne odpowiednio przy $\alpha = 0$ i $\alpha = 90^\circ$ i wyprowadzono je przy założeniu, że $\sin 0,5 \omega T_{21} = 0,5 \omega T_{21}$, co daje błąd o wartości ok. 20% przy $\omega T_{21} \approx 2$. Ponadto przyjęto t_m , że składowa nieokresowa nie jest tłumiona. Z równań tych wynika, że wartość rozpatrywanego sygnału zależy od tych samych czynników co i I_{21}^{sr} . W tych samych warunkach obciążenia przekładnika sygnał wejściowy przy braku składowej nieokresowej w prądzie pierwotnym ($\alpha = 90^\circ$) jest mniejszy niż przy maksymalnej zawartości składowej nieokresowej ($\alpha = 0$). Tłumaczy się to tym, że w pierwszym przypadku szybkość narastania prądu pierwotnego (a więc i wtórnego) jest znacznie większa i szybciej następuje nasycenie niż w drugim przypadku. Właściwość ta posiada znaczenie jedynie w takich przypadkach, w których rozruch zabezpieczenia występuje w pierwszym półokresie stanu przejściowego. Istotnie, przy $\alpha = 90^\circ$ w drugim półokresie $\Delta \psi_{s*} = 2$ i wartość sygnału wyznaczona na podstawie wzoru (6b) jest większa niż wartość sygnału wyznaczona z zależności (5b).

5. WNIOSKI

- a) Zastosowanie prostokątnej charakterystyki magnesowania do analizy pracy przekładników prądowych w stanach nieustalonych umożliwia znalezienie dostatecznie prostych wzorów do orientacyjnych obliczeń sygnałów wejściowych zabezpieczeń różnicowych i porównawczo-fazowych podstawowych elementów stacji i elektrowni, przy stałej czasowej nie mniejszej niż 0,15 s z uwzględnieniem wszystkich czynników, od których zależą te sygnały.
- b) Wartości sygnałów użytecznych zabezpieczeń różnicowych i porównawczo-fazowych w okresach następujących po okresie nasycenia przekładnika,

nie zależą od strumienia resztkowych i obciążenia przekładników prądowych. Sygnały wejściowe zabezpieczenia porównawczo-fazowego nie zależą także od wielkości prądu pierwotnego.

- c) Maksymalna wielkość średniej wartości prądu różnicowego za okres w stanie nieustalonym praktycznie jest równa średniej wartości składowej nieokresowej prądu pierwotnego w tym okresie.
- d) Jeśli w pierwszym okresie stanu przejściowego przekładnik prądowy nasyca się, to na wartość sygnałów wejściowych zabezpieczeń: różnicowego i porównawczo-fazowego w tym okresie, oprócz czynników wymienionych w p.2, istotnie wpływa wartość strumienia resztkowego i obciążenia przekładnika. Sygnał wejściowy zabezpieczenia porównawczo-fazowego na początku stanu przejściowego przy braku składowej nieokresowej może być mniejszy niż przy maksymalnej zawartości składowej nieokresowej.

LITERATURA

- [1] Drozdov A.D.: Električeskije oepn s ferromagnitnymi serdecnikami w relejnoj zaščite; *Energia*, 1965, s. 240.
- [2] Wright A.: Current transformer; London 1968, s. 300
- [3] Wiszniewski A.: Improvement of current-transformer transient performance; *Proc. IEE*, Vol. 119, Nr 5, 1972, s. 564-568.
- [4] Żydanowicz J.: Niektóre zagadnienia związane z doбором przekładników prądowych do zabezpieczeń szybko działających; *Materiały III Międzynarodowej Konf. Nauk. - Aktualne problemy elektroenergetyczne automatyki zabezpieczeniowej*; Gliwice 1975, s. 183-201.
- [5] Kazanski V.E.: Transformatory toka v ustrojstwach relejnoj zaščity i avtomatiki; *Energia*, 1978, s. 264.
- [6] Kužekov S.L. i in.: Universalnye charakteristiki transformatorov toka v pieriechodnom režimie korotkogo zamykanija; *Električestvo* 1975, Nr 2, s. 9-14.
- [7] Nevaš V.I., Korolev O.P.: Matematičeskoje modelirovanije distancionnoj zaščity LEP svierchrysokogo napraženija; *Izvestia Vuzov-energetika*, 1975, Nr 2, s. 13-18.
- [8] Drozdov A.D. i in.: Vierojatnost vozniknovienija bolšykh pogriešnostej transformatovo toka v pieriechodnyh režimach i ocenka dejstviija relejnyh zaščity; *Električestvo*, 1978, Nr 6, s. 29-39.

Wpłynęło do Redakcji 20.VI.1980 r.

Recenzent:

Doc. dr hab. inż. Wilibold Winkler

АНАЛИЗ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНЫХ ЗАЩИТ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ НАСЫЩЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА

Резюме

В статье представлен анализ входных сигналов дифференциальных и дифференциально-фазных защит сосредоточенных объектов при насыщениях трансформаторов тока. Предлагается применять вычислительные машины для анализа тех сигналов с одновременной аппроксимацией кривой намагничивания ТТ с помощью прямоугольной характеристики. Представлена математическая модель трансформатора тока.

ANALYSIS OF DIFFERENTIAL AND PHASE-COMPARISON
PROTECTION INPUT SIGNALS OF CONCENTRATED OBJECTS
DURING CONSIDERABLE CURRENT TRANSFORMER SATURATIONS

Summary

The input-signals of differential and phase-comparison protection during considerable saturation of current transformers have been analyzed. It has been proposed to analyze the above mentioned signals by means of digital computers substituting the real magnetization characteristic by the rectangular characteristic. A mathematical model of the current transformer has been presented.