

BADANIE STANÓW PRZEJŚCIOWYCH W UKŁADACH Z BATERIAMI KONDENSATORÓW ¹⁾

Investigation of Transients Resulting from the Switching of Capacitor Banks

Tadeusz ŁOBOS

Jacek REZMER

Politechnika Wrocławska

Streszczenie: Stany przejściowe spowodowane załączeniem baterii kondensatorów w systemach elektroenergetycznych, wpływają w znacznym stopniu na jakość energii elektrycznej. Przepięcia mogą teoretycznie osiągać wartości szczytowe rzędu dwukrotnej wartości znamionowej. Prądy przejściowe mogą osiągać wartości do dziesięciu razy ponad znamionowy prąd baterii kondensatorów, w ciągu kilku milisekund. Innym przypadkiem trudnych warunków pracy jest załączanie drugiej baterii kondensatorów do tych samych szyn zbiorczych. W pracy są analizowane przebiegi przejściowe napięć i prądów. Elektroenergetyczny system przesyłowy symulowano przy użyciu programu ATP-EMTP. Zmieniono niektóre parametry wpływające na amplitudę przebiegów przejściowych, takie jak prąd obciążenia, pojemność baterii, rozmieszczenie baterii kondensatorów wzdłuż linii oraz czasy załączeń baterii. Parametry składowych przejściowych badano z zastosowaniem techniki Fouriera oraz metody Prony'ego. Badania wykazują przewagę metody opierającej się na modelu Prony'ego nad techniką Fouriera.

Summary: Transients resulting from switching capacitor banks in electrical distribution systems are affecting power quality. Transient overvoltages can theoretically reach phase to earth peak values of twice the rated voltage value. Current transients can reach values up to ten times the capacitor nominal current, with duration of several milliseconds. Another case of severe operating condition is switching a second capacitor bank connected to the same bus. Characteristics of the transients are analysed in the paper. A distribution system was simulated using the EMTP software. Some parameters, which have influence on magnitude of transients, such as load current, capacitor size, location of capacitor banks along the feeder and time of capacitor switching, have been varied. Frequencies of the transient components have been investigated using the Fourier analysis and the Prony model. The investigations show advantages of the methods based on the Prony model versus the Fourier analysis.

Słowa kluczowe: stany przejściowe, bateria kondensatorów, metoda Prony'ego, układ rozdzielczy

Key words: transients, capacitor bank, Prony method, distribution system

1. WPROWADZENIE

Liberalizacja europejskiego rynku energii elektrycznej wzmacnia konkurencję. Jest to główną przyczyną wzrostu wymagań stawianych jakości energii. Jakość energii elektrycznej ma obecnie coraz większe znaczenie zarówno dla jej odbiorców, jak i wytwórców.

W systemie elektroenergetycznym przebieg napięcia powinien być idealną sinusoidą o stałej, znamionowej częstotliwości i amplitudzie. Różne zakłócenia mogą znacząco wpływać na ten przebieg. Należą do nich, między innymi, zakłócenia spowodowane stosowaniem układów kompensacji mocy

biernej, konstruowane jako przełączalne baterie kondensatorów. Sposób rozliczania mocy biernej sprawił, że w ciągu ostatnich lat wzrosło zainteresowanie urządzeniami poprawy współczynnika mocy. Przełączenia baterii kondensatorów powodują znaczące zakłócenia krzywej napięcia i prądu w postaci krótkotrwałych stanów przejściowych [1,2]. Składowe przejściowe negatywnie wpływają na działanie urządzeń kontroli i zabezpieczeń systemu przesyłowego, a także na wrażliwe urządzenia przemysłowe.

Przepięcia teoretycznie mogą osiągać wartości szczytowe równe dwukrotnej wartości znamionowej. Prądy przejściowe mogą osiągać wartości do dziesięciu razy ponad znamionowy prąd baterii kondensatorów w ciągu kilku milisekund.

1) Artykuł był prezentowany podczas V Szkoły — Konferencji pt.: „Elektrotechnika, prądy niesinusoidalne” w Lubiatowie (26–28 czerwca 2000 r.). Decyzją Komitetu Naukowego konferencji został wybrany do opublikowania w czasopiśmie **Jakość i Użytkowanie**

W pracy analizowano stany przejściowe oraz czynniki, które wpływają na ich intensywność. Parametry składowych przejściowych były estymowane z zastosowaniem modelu Prony'ego oraz techniki Fouriera.

Metoda Prony'ego jest techniką modelowania przebiegu jako kombinacji liniowej składowych wykładniczych. Choć nie jest to estymacja widmowa, metoda Prony'ego jest bliska liniowej predykcji, metodą najmniejszych kwadratów, stosowanej w algorytmach estymacji parametru AR i ARMA [3]. W metodzie Prony'ego poszukiwany jest odpowiedni model wykładniczy pasujący do danych próbek przebiegu, w odróżnieniu do metod AR i ARMA, które poszukują probabilistycznego modelu na podstawie statystyki drugiego rzędu. W pracy [4] przedstawiono nową metodę pomiaru w czasie rzeczywistym częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, opartą na modelu Prony'ego.

Badane przebiegi przejściowe otrzymano na drodze symulacji komputerowej systemu przesyłowego za pomocą programu ATP-EMTP. Symulacje prowadzono dla różnych wartości prądu obciążenia, pojemności baterii kondensatorów, rozmieszczenia baterii i czasów przełączeń. Badania pokazują przewagę metody opierającej się na modelu Prony'ego nad techniką Fouriera.

2. METODA PRONY'EGO

Zakłada się, że N kolejnych wartości próbek badanego przebiegu aproksymuje się sumą p zespolonych składowych wykładniczych:

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^p A_k e^{(\alpha_k + j\omega_k)(n-1)T_p + j\Psi_k} \quad (1)$$

gdzie:

- $n = 1, 2, \dots, N$
- T_p — okres próbkowania,
- A_k — amplituda,
- α_k — współczynnik tłumienia,
- ω_k — pulsacja,
- Ψ_k — początkowa faza.

Zależność (1) można przedstawić w innej formie:

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} \quad (2)$$

gdzie:

- $h_k = A_k e^{j\Psi_k}$ — amplituda zespolona składowej k ,
- $z_k = e^{(\alpha_k + j\omega_k)T_p}$ — częstotliwość zespolona składowej k .

Rozwiązanie problemu polega na minimalizacji błędu:

$$\delta = \sum_{n=1}^N |\varepsilon[n]|^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon[n] = x[n] - \hat{x}[n] = x[n] - \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} \quad (4)$$

$x[1] \dots x[N]$ jest wektorem kolejnych próbek przebiegu.

Zagadnienie powyższe stanowi trudny analitycznie problem nieliniowy. Sposób rozwiązania zagadnienia podał Prony Marie Riche de (1755–1839). Wykorzystując jego metodę, zagadnienie można sprowadzić do układu równań liniowych.

Zależność (2) można zapisać w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_p^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & \dots & z_p^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x[1] \\ x[2] \\ \vdots \\ x[p] \end{bmatrix} \quad (5)$$

Wyrażenie (5) przedstawia układ równań liniowych, gdzie niewiadomymi są amplitudy zespolone składowych wykładniczych.

Częstotliwości zespolone z_k definiuje się jako pierwiastki wielomianu:

$$F(z) = \prod_{k=1}^p (z - z_k) = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_p) \quad (6)$$

Wielomian (6) może być przedstawiony w postaci kanonicznej:

$$F(z) = \sum_{m=0}^p a[m]z^{p-m} = a[0]z^p + a[1]z^{p-1} + \dots + a[p-1]z + a[p] \quad (7)$$

Przesuwając wskaźnik w (2) od n do $n-m$ i mnożąc przez parametr $a[m]$ otrzymuje się:

$$a[m]x[n-m] = a[m] \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-m-1} \quad (8)$$

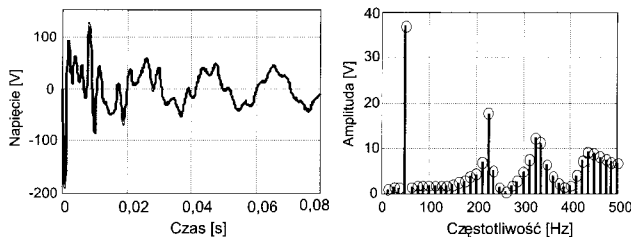
Równanie (8) może być modyfikowane:

$$\sum_{m=0}^p a[m]x[n-m] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-p} \left\{ \sum_{m=0}^p a[m]z_k^{p-m-1} \right\} \quad (9)$$

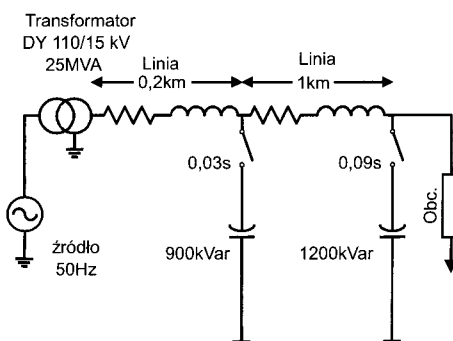
Suma z prawej strony (9) to wielomian zdefiniowany przez (7), mający wartość zero dla każdego z pierwiastków z_k :

$$\sum_{m=0}^p a[m]x[n-m] = 0 \quad (10)$$

Równanie (10) rozwiązuje się w celu otrzymania współczynników wielomianu (7). Następnie oblicza się pierwiastki wielomianu (7). Współczynniki tłumienia i częstotliwości składowych periodycznych można określić z (2) na podstawie pierwiastków z_k .



Rys.1. Napiecie w stanie przejsciowym oraz charakterystyka amplitudowa



Rys. 2. Jednofazowy schemat symulowanego systemu przesylowego

W praktyce obliczeń, w celu poprawy dokładności metody, stosuje się liczbę próbek pomiarowych większą niż minimalna, wymagana do utworzenia modelu wykładniczego, tj. $N > 2p$. W takim przypadku układ równań (10) jest sprowadzany do postaci:

$$\sum_{m=0}^p a[m]x[n-m] = e[n] \quad (11)$$

Problem estymacji polega wówczas na minimalizacji błędu średniokwadratowego:

$$E = \sum_{n=p+1}^N |e[n]|^2 \quad (12)$$

3. EKSPERYMENT Z PRZEBIEGIEM SYMULOWANYM

W celu zbadania możliwości proponowanego podejścia wykonano estymację parametrów przebiegu opisanego zależnością:

$$u(t) = \sum_{k=1}^4 [A_k e^{\alpha_k t} \cos(2\pi f_k t + \psi_k)] + r(t) [V] \quad (13)$$

gdzie $r(t)$ = szum biały o wartości średniej zerowej i wariancji równej 1.

Tabela 1. Zadane parametry składowych przebiegu (13)

k	A	α .	f	ψ
1	36,8	0,00	50	-1,8
2	45,3	-27,8	227	1,2
3	88	-79,4	330	1,4
4	106	-149	430	1,8

Tabela 2. Estymowane metodą Prony'ego parametry składowych sygnału (13)

k	A	α .	F	ψ
1	38,11	-0,72	49,98	-1,79
2	47,48	-29,74	227,1	1,19
3	90,67	-83,12	329,9	1,40
4	110,1	-153,6	430,4	1,76

Przyjęte parametry symulowanego przebiegu, pokazane na rysunku 1, są zebrane w tabeli 1.

Przedstawiono wyniki estymacji parametrów przebiegu napięcia metodą Prony'ego dla okna pomiarowego z liczbą próbek $N = 80$. W metodzie Prony'ego przyjęto liczbę składowych wykładniczych $p = 12$. Estymowane parametry składowych wykładniczych przebiegu pokazano w tabeli 2. Odpowiednią charakterystykę częstotliwościową obliczoną metodą Fouriera pokazano na rysunku 1.

Z przeprowadzonych badań wynika, że metoda Prony'ego umożliwiła względnie dokładne wyznaczanie parametrów poszczególnych składowych badanego sygnału. Metoda Fouriera zawodzi, zgodnie z oczekiwaniem, szczególnie w przypadku składowych szybko zanikających.

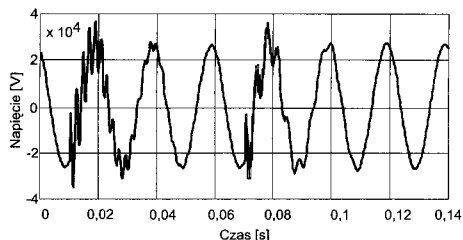
4. SYMULACJA SYSTEMU ROZDZIELCZEGO

W ostatnich latach programy symulacji złożonych obwodów elektrycznych oraz systemów kontroli zostały zasadniczo ulepszone. Symulowanie stanów przejściowych w obwodach elektrycznych stało się możliwe bez udziału sprzętowych układów laboratoryjnych. Spośród wielu dostępnych programów symulacji, program ATP-EMTP służy do modelowania złożonych jedno- i trójfazowych systemów elektroenergetycznych.

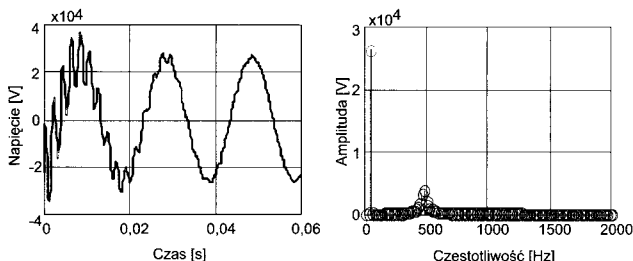
W pracy przedstawiono wyniki badań dla systemu, którego jednofazowy schemat pokazano na rysunku 2. Dwie baterie kondensatorów zainstalowano wzdłuż linii zasilającej. W kilku przypadkach symulacji zarejestrowano prądy i napięcia na początku linii.

Rysunek 3 pokazuje przebieg napięcia, gdy pierwsza bateria kondensatorów (900 kVar) była załączana w 0,03 s, a druga (1200 kVar) w 0,09 s. Napięcie było analizowane z zastosowaniem okna próbkowania równego 0,06 s i częstotliwości próbkowania 10 kHz. Ponieważ zasada działania urządzeń kompensacji mocy biernej pozwala uzyskać informacje o czasach przełączeń kondensatorów, każdy stan przejściowy można analizować osobno.

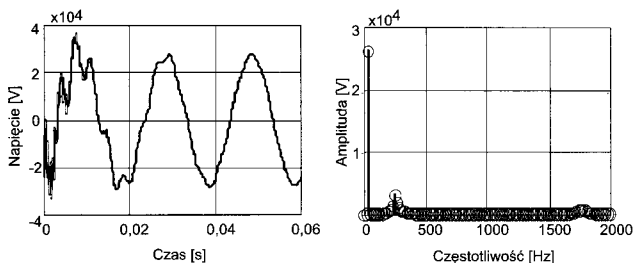
Stosując metodę Prony'ego dla pierwszego stanu przejściowego, wyznaczono dwie składowe napięcia, których parametry zamieszczono w tabeli 3. Przebieg oraz jego charakterystykę amplitudową przedstawia rysunek 4.



Rys. 3. Zarejestrowany przebieg napięcia



Rys. 4. Pierwszy stan przejściowy oraz charakterystyka amplitudowa



Rys. 5. Drugi stan przejściowy oraz charakterystyka amplitudowa

Podczas analizy drugiego stanu przejściowego estymowano trzy składowe napięcia. W tabeli 4 pokazano wyznaczone składowe, a analizowany przebieg oraz odpowiednią charakterystykę amplitudową na rysunku 5.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają, że metoda Fouriera nie może być stosowana do analizy tego rodzaju przebiegów.

5. WNIOSKI

Stany przejściowe wynikające z przełączeń baterii kondensatorów w elektrycznych systemach dystrybucji wpływają na jakość energii. Parametry składowych przejściowych badano za pomocą metody Prony'ego oraz techniki Fouriera. Badania potwierdzają wyraźną przewagę metody opierającej się na modelu Prony'ego nad techniką Fouriera, szczególnie w odniesieniu do szybko zanikających składowych sygnałów.

Tabela 3. Parametry składowych napięcia pierwszego stanu przejściowego

k	A	α	f	ψ
1	20502	-76,06	475,9	0,69
2	26297	-0,06	49,99	-2,64

Tabela 4. Parametry składowych napięcia drugiego stanu przejściowego

k	A	α	f	ψ
1	27568	-0,53	49,92	-2,62
2	14318	-68,19	269,4	0,16
3	11845	-209,1	1777	-1,45

LITERATURA

1. Coury D.V., dos Santos C.J., Tavares M.C.: *Transient analysis resulting from short capacitor switching in an actual electrical distribution system*. 8th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, Athens 1998, vol. I, 292-297.
2. Gagaoudakis N.G., Geogropoulos A.D.: *Investigation of harmonics in relation to 150kV capacitor banks at PPC's Philippi substation*. 8th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, Athens 1998, vol. II, 825-830.
3. Kay S.M.: *Modern spectral estimation: theory and application*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1988.
4. Łobos T., Rezmer J.: *Real time determination of power system frequency*. IEEE Trans. Instr. Measur. 1997, 46, 2, 877-881.



Prof. dr hab. inż. Tadeusz Łobos

Otrzymał stopień magistra, doktora i doktora habilitowanego, wszystkie w dziedzinie elektrotechniki na Politechnice Wrocławskiej, odpowiednio w latach: 1960, 1967 i 1975. Jest zatrudniony na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej od 1960. W roku 1989 otrzymał tytuł profesora. Od 1982 do 1986 pracował na Uniwersytecie Erlangen-Norymberga, Niemcy. W roku 1998 otrzymał

Nagrodę Badawczą Humboldta (Humboldt Research Award). Aktualnie zainteresowania naukowe skupia na zagadnieniach stanów przejściowych w systemach elektroenergetycznych, automatyki i zabezpieczeń systemów, a szczególnie na zastosowaniach sieci neuronowych i metod przetwarzania sygnałów w elektrotechnice.

Adres: Politechnika Wroclawska; Pl. Grunwaldzki 13, 50-370 Wrocław, tel. (+4871)3203448, fax. (+4871)3202006; e-mail: lobos@elektryk.ie.pwr.wroc.pl lobos@ipee.pwr.wroc.pl



Dr inż. Jacek Rezmer

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w 1987 r. W roku 1995 uzyskał stopień doktora za pracę dotyczącą cyfrowych metod pomiaru częstotliwości w czasie rzeczywistym. Od 1987 r. jest zatrudniony w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, początkowo na stanowisku asystenta, a obecnie adiunkta. Interesuje się zagadnieniami

związanymi z jakością energii elektrycznej, a szczególnie sposobami wyznaczania parametrów sygnałów elektrycznych za pomocą nowoczesnych metod estymacji.

Adres: Politechnika Wroclawska; Pl. Grunwaldzki 13, 50-370 Wrocław, tel. (+4871)3202625, fax. (+4871)3202006; e-mail: rezmer@ipee.pwr.wroc.pl