

- “non-classic” signal model which differs from the „classic” model by using expansion of exponential expression representing direct current component of fault current into Taylor series.

The computational complexity of all models is similar. Partial conclusions have been presented when each of individual algorithms has been discussed. To summarize, it can be stated that the third of the considered algorithms i.e. that with expansion of exponential function into Taylor series, has shown its supremacy over two others: it is highly universal and significantly insensible to the direct current component of fault current. Regarding the paper’s volume, the analysis of errors resulting from the limitation of Taylor series elements number to three has not been reported. However, the reported figures give the graphical image of estimation and show that such limitation does not lead to significant errors.

1. Rosołowski E. *Adaptive algorithm for elimination of direct current component in protection signal*, *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2000. – Z. 3. – P. 57–61 (in Polish). 2. Lobos T., Rezmer J. *Wavelet transform for real-time estimation of transmission line impedance under transient conditions*, *Electrical Engineering*. – 84/2002. – P. 63–70. 3. Soliman S.A., Alammari R.A., El-Hawary M.E. *A new digital transformation for harmonics and DC offset removal for the distance fault locator algorithm.*, *Electric Power System Research*. – 2004. – P. 389–395. 4. El-Naggar K.M., Gilany M.I. *A discrete dynamic filter for detecting and compensating CT saturation*, *Electric Power System Research*. – 2006. – P. 527–533. 5. Minambres J.F. *Arguelles (I inni): A new method fo decaying dc offset removal for digital protective relays*, *Electric Power System Research*. – 2006. –P. 194–199.

УДК 621.313.322-81.621.311.22

О.С. Міняйло, О.І. Маврін, К.Б. Покровський  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕС

## МОДЕЛЮВАННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ НА НЕЙТРАЛЬ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА

© Міняйло О.С., Маврін О.І., Покровський К.Б., 2009

**Отримано диференційні рівняння асинхронізованого турбогенератора в режимі одно- та двофазного замикання на нейтраль для визначення характеристик струмів несиметричних режимів роботи.**

**Here we obtain differential equations of doubly fed wound induction generator in one- and two-phase fault on the neutral to determine the asymmetric mode.**

**Постановка проблеми.** Застосування в енергосистемах асинхронізованих турбогенераторів (АСТГ) дозволяє ефективно вирішити проблему споживання надлишків реактивної потужності, що виникають в високовольтних мережах у години “провалів” графіка навантажень. Крім того, АСТГ позбавлені обмежень за стійкістю роботи в режимах споживання реактивної потужності, які властиві традиційним синхронним генераторам [1].

Проведені раніше дослідження [2] показують деяке зниження струмів трифазного короткого замикання в мережах з асинхронізованими генераторами, що додатково збільшує ефективність їх використання.

**Аналіз останніх досліджень.** Останнім часом ведуться роботи [2] з виявлення характеристик режимів АСТГ під час симетричного трифазного короткого замикання, однак особливості режимів

асинхронізованих генераторів під час несиметричних коротких замикань ще недостатньо вивчені. Генератори електростанцій звичайно працюють в схемі з ізольованою нейтраллю з блочним трансформатором. Для дослідження властивостей АСТГ в умовах роботи у схемах з використанням заземленої нейтралі генератора потрібно розробити математичний апарат моделювання несиметричних замикань на нейтраль. У зв'язку з цим завдання створення математичних моделей АСТГ в режимах несиметричних коротких та неметалевих замикань стає актуальним.

**Задача дослідження.** Як завдання дослідження визначимо отримання системи диференціальних рівнянь АСТГ під час одно- та двофазного короткого замикання на нейтраль. З цією метою застосуємо методику виведення рівнянь стану традиційного синхронного генератора [4], яка передбачає спільне розв'язання системи диференціальних рівнянь генератора в симетричному режимі рівнянь несиметрії. Застосуємо відомі рівняння для АСТГ [2] у векторній формі з урахуванням симетрії роторної обвитки по осях  $d, q$  та багатоконтурної заступної схеми масиву ротора і рівняннями несиметрії, що мають такий вигляд.

Під час однофазного короткого замикання фази  $a$  на нейтраль:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= 0 \\ i_b &= i_c = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

аналогічно, під час двофазного короткого замикання на нейтраль:

$$\left. \begin{aligned} u_b &= u_c = 0 \\ i_a &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Варто зазначити, що умови (1) та (2) передбачають як вихідний режим неробочого ходу, що прийнято для спрощення. Для врахування впливу вихідного навантаження потрібно скласти додаткові рівняння за законами Кірхгофа для визначення розподілу струмів.

Перетворимо умови несиметрії (2) та (1) до, наприклад, комплексної системи координат для відповідних випадків несиметрії.

1. Для випадку однофазного короткого замикання на нейтраль.

$$u_a = \vec{u} e^{j\gamma_r} + \vec{u}^* e^{-j\gamma_r} + 2u_0 = 0; \quad (3)$$

$$i_b = \vec{i} e^{j\gamma_r} e^{-j2\pi/3} + \vec{i}^* e^{-j\gamma_r} e^{j2\pi/3} + 2i_0 = 0; \quad (4)$$

$$i_c = \vec{i} e^{j\gamma_r} e^{j2\pi/3} + \vec{i}^* e^{-j\gamma_r} e^{-j2\pi/3} + 2i_0 = 0; \quad (5)$$

$$i_0 = \frac{1}{2} \vec{i} e^{j\gamma_r} = \frac{1}{2} \vec{i}^* e^{-j\gamma_r}; \quad (6)$$

2. Для випадку однофазного короткого замикання на нейтраль.

$$i_a = \vec{i} e^{j\gamma_r} + \vec{i}^* e^{-j\gamma_r} + 2i_0 = 0; \quad (7)$$

$$u_b = \vec{u} e^{j\gamma_r} e^{-j2\pi/3} + \vec{u}^* e^{-j\gamma_r} e^{j2\pi/3} + 2u_0 = 0; \quad (8)$$

$$u_c = \vec{u} e^{j\gamma_r} e^{j2\pi/3} + \vec{u}^* e^{-j\gamma_r} e^{-j2\pi/3} + 2u_0 = 0; \quad (9)$$

$$i_0 = \vec{i} e^{j\gamma_r}; \quad (10)$$

$$u_0 = -\frac{1}{2} \vec{u} e^{j\gamma_r}. \quad (11)$$

Тут позначено:  $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$  – напруги та струми у відповідних фазах,  $u_0, i_0$  – напруга та струм нульової послідовності,  $\gamma_r$  – кутове положення ротора,  $\vec{u}, \vec{i}$  – напруга та струм у комплексній площині та відповідні спряжені значення  $-\vec{u}^*, \vec{i}^*$ .

На відміну від [4] приймемо для АСТГ симетричну обвитку збудження  $x_d = x_q$ ,

$$\vec{u}_f = u_{fq} + ju_{fd}, \quad \vec{i}_f = i_{fq} + ji_{fd} \quad (12)$$

з триконтурною заступною схемою масиву ротора [3], де  $x_d, x_q$  – синхронні індуктивні опори генератора по відповідних осях системи координат,  $U_{fd}, U_{fq}, i_{fd}, i_{fq}$  – величини напруг та струмів збудження у відповідних обвитках ротора АСТГ там їх значення у комплексній площині –  $\vec{i}_f, \vec{u}_f$ .

Крім того, потрібно врахувати рівняння для нульової складової вигляду

$$u_0 = r_0 i_0 + \frac{d\Psi_0}{dt}, \quad (13)$$

де потокощеплення  $\Psi_0 = x_0 i_0$ ,  $x_0, i_0$  – опір та струм нульової послідовності.

Складемо рівняння, що спряжене рівнянню статорного контуру та зв'яжемо обидва на основі умов несиметрії (3)–(10) з умовою  $i_0 = 0$ .

У результаті, за аналогією з [4], можна отримати для двофазного замикання на нейтраль

$$3r_0 \vec{i}_{20} + \frac{d\vec{\Psi}_{20}}{dt} + j\omega \vec{\Psi}_{20} = 0, \quad (14)$$

де

$$\vec{\Psi}_{20} = \vec{i}_{20} (2x + x_0) + x_{af} (\vec{i}_{f_{20}} - \vec{i}_{f_{20}}^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a1} (\vec{i}_{1_{20}} - \vec{i}_{1_{20}}^* e^{-j2\gamma_r}) + \dots + x_{an} (\vec{i}_{n_{20}} - \vec{i}_{n_{20}}^* e^{-j2\gamma_r}), \quad (15)$$

а для випадку однофазного замикання на нейтраль

$$3r_0 \vec{i}_{10} + \frac{d\vec{\Psi}_{10}}{dt} + j\omega \vec{\Psi}_{10} = 0, \quad (16)$$

де

$$\vec{\Psi}_{10} = \vec{i}_{10} (2x + x_0) + x_{af} (\vec{i}_{f_{10}} - \vec{i}_{f_{10}}^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a1} (\vec{i}_{1_{10}} - \vec{i}_{1_{10}}^* e^{-j2\gamma_r}) + \dots + x_{an} (\vec{i}_{n_{10}} - \vec{i}_{n_{10}}^* e^{-j2\gamma_r}). \quad (17)$$

На відміну від [4] з урахуванням симетрії обвиток збудження АСТГ отримуємо

$$\vec{\Psi}_f = \vec{i}_f x_f + x_{af} (\vec{i} - \vec{i}^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a1} (\vec{i}_1 - \vec{i}_1^* e^{-j2\gamma_r}) + \dots + x_{an} (\vec{i}_n - \vec{i}_n^* e^{-j2\gamma_r}), \quad (18)$$

а для трьох демпферних контурів аналогічно

$$\vec{\Psi}_1 = \vec{i}_1 x_1 + x_{af} (\vec{i} - \vec{i}^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a2} (\vec{i}_2 - \vec{i}_2^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a3} (\vec{i}_3 - \vec{i}_3^* e^{-j2\gamma_r}), \quad (19)$$

$$\vec{\Psi}_2 = \vec{i}_2 x_2 + x_{af} (\vec{i} - \vec{i}^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a1} (\vec{i}_1 - \vec{i}_1^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a3} (\vec{i}_3 - \vec{i}_3^* e^{-j2\gamma_r}), \quad (20)$$

$$\vec{\Psi}_3 = \vec{i}_3 x_{a3} + x_{af} (\vec{i} - \vec{i}^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a1} (\vec{i}_1 - \vec{i}_1^* e^{-j2\gamma_r}) + x_{a2} (\vec{i}_2 - \vec{i}_2^* e^{-j2\gamma_r}). \quad (21)$$

Тут  $r_0, x_0$  – активний та реактивний опір нульової послідовності,  $i$  – струм статора генератора,  $i_f$  – струм збудження генератора,  $i_1, i_n$  – струми  $n$  роторних контурів;  $\gamma_r$  – кутове положення ротора;  $x, x_{af}, x_{a1}, x_{an}$  – опори взаємодії відповідних контурів, індекси 20 і 10 відповідають дво- і однофазному замиканню на нейтраль.

Отримані рівняння у векторній формі надають можливість перейти до нерухомої відносно ротора системи координат  $d, q$ , або до нерухомої відносно статора системи  $\alpha, \beta$ .

Наприклад, у системі координат  $d, q$  рівняння для статорних контурів у випадку однофазного короткого замикання на нейтраль набудуть вигляду

$$3r_0 i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + j\omega \Psi_d = 0; \quad (22)$$

$$3r_0 i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + j\omega \Psi_q = 0; \quad (23)$$

$$\Psi_d = (2x + x_0) i_d + x_{af} [i_{fd} (1 + \cos 2\gamma_r) - i_{fq} \sin 2\gamma_r] + x_{a1} [i_{1d} (1 + \cos 2\gamma_r) - i_{1q} \sin 2\gamma_r] + \dots + x_{a3} [i_{3d} (1 + \cos 2\gamma_r) - i_{3q} \sin 2\gamma_r]; \quad (24)$$

$$\Psi_q = (2x + x_0) i_q + x_{af} [i_{fq} (1 - \cos 2\gamma_r) + i_{fd} \sin 2\gamma_r] + x_{a1} [i_{1q} (1 - \cos 2\gamma_r) + i_{1d} \sin 2\gamma_r] + \dots + x_{a3} [i_{3q} (1 - \cos 2\gamma_r) - i_{3d} \sin 2\gamma_r], \quad (25)$$

а для випадку двофазного замикання на нуль

$$2u_0 \cos \gamma_r = r_2 i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - j\omega \Psi_q; \quad (26)$$

$$-2u_0 \sin \gamma_r = r_2 i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - j\omega \Psi_d; \quad (27)$$

$$\Psi_d = x_0 i_d + x_{af} i_{fd} + x_{a1} i_{1d} + \dots + x_{a3} i_{3d}; \quad (28)$$

$$\Psi_q = x_0 i_q + x_{af} i_{fq} + x_{a1} i_{1q} + \dots + x_{a3} i_{3q}. \quad (29)$$

Для врахування неметалевого замикання необхідно прийняти  $r_{кз} = r + r_3$ ,  $x_{кз} = x + x_3$ , де  $x_3$ ,  $r_3$  – параметри опору короткого замикання,  $x$ ,  $r$  – параметри опору статора.

**Висновки.** На основі відомого підходу отримано рівняння стану асинхронізованого генератора в режимі одно- та двофазного короткого замикання на нуль.

1. Міняйло А.С., Пыльпюк Р.В., Покровский К.Б., Шматюк Н.П. Технично-економическая ефективность применения на электростанциях асинхронного режима асинхронизированного турбогенератора // Изв. вузов. Энергетика. – Минск, 1991. – № 11. – С. 117–127. 2. Міняйло О.С., Покровський К. Струми короткого замикання асинхронізованого турбогенератора в різних режимах роботи // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2001. – № 418: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 127–131. 3. Міняйло О.С., Покровський К.Б., Маврін О.І., Мальцева Н.Г. Диференційні рівняння стану асинхронізованого генератора в режимі двофазного замикання // Тез. доп. до 5-ї Міжнар. наук.-техн. конф. “Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці”. – Львів, 17–20 жовтня 2007. 4. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.

УДК 621.365.2; 621.311.1

Р.Я. Паранчук

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВОГО КОЛА ДУГОВОЇ ПЕЧІ

© Паранчук Р.Я., 2009

**Запропоновано математичну та цифрову моделі нейромережевої системи неперервного вимірювання параметрів силового кола дугової сталеплавильної печі. Подано результати моделювання процесу ідентифікації параметрів її силового кола.**

**Mathematical and digital model of neural network based system for continuous measuring of power circuit parameters in arc steel-melting furnace are offered. The results of simulation of power circuit parameters measuring process are given.**

**Вступ.** Проблема підвищення електротехнологічної ефективності керування режимами плавлення в дугових сталеплавильних печах (ДСП) трифазного струму, зокрема зниження енергоємності металопродукції, поліпшення показників електромагнітної сумісності та екологічної ефективності є пріоритетною для електрометалургійної галузі України. Ефективним і дієвим підходом у вирішенні окресленої вище проблеми є розроблення високоефективних систем