

ВИЗНАЧЕННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИХ ПАРАМЕТРІВ У МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ НЕЯВНОПОЛЮСНИХ МАШИН З ЄДИНИМ МАГНЕТНИМ ПОТОКОМ

© Горячко В., Коцюба М., Рижий Т., 2004

Запропоновано методикау визначення диференційних електромагнетних параметрів на підставі геометричних параметрів, струмів віток і магнетних потоків у колових математичних моделях неявнополюсних машин з єдиним магнетним потоком.

A technique of differential electromagnetic parameters determination in circuit mathematical models of non-salient pole machines with common magnetic flux on the basis of geometric parameters, currents of branches and magnetic fluxes is offered.

Постановка проблеми. Розроблені математичні моделі неявнополюсних електричних машин на підставі єдиного магнетного потоку (без розділення його на основний та потік розсіяння) [1, 2, 3] дозволяють досліджувати електромагнетні й електромеханічні перехідні процеси з високим рівнем адекватності. Під час їх тестування в автономному режимі машин з'ясувалося, що моделі з використанням диференційних магнетних параметрів (ДМП) мають переваги над моделями з диференційними електромагнетними параметрами (ДЕМП) за компонентами економності та стійкості. Саме першим моделям у вказаних працях приділяли основну увагу. Проте моделі з ДЕМП бачаться нам перспективнішими для формування загальної математичної моделі системи електропередачі. Тому нами було поставлено завдання визначення диференційних електромагнетних параметрів неявнополюсної машини на підставі згаданих вище математичних моделей.

Аналіз останніх досліджень. Економні математичні моделі неявнополюсних машин на підставі теорії кіл, враховуючи їх складні електромагнетні зв'язки, передбачають велику кількість припущень, що не дозволяє отримати під час симулювання процесів високоточні висліди [4, 5]. Сучасний стан обчислювальної техніки та числових методів і труднощі, пов'язані з визначенням граничних умов, не можуть забезпечити високу адекватність високочастотних математичних моделей, в яких ДЕМП визначаються на підставі теорії електромагнетного поля [6]. Тому актуальною задачею залишається визначення диференційних електромагнетних параметрів у високоефективних за точністю і економністю колових моделях електричних машин.

Формулювання цілей статті. Метою статті є визначення диференційних електромагнетних параметрів у високоточних математичних моделях неявнополюсних машин, що дозволить розширити їх застосування для аналізу перехідних процесів систем електропередачі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для формування моделі неявнополюсної машини з ДЕМП запишемо рівняння електричного кола у вигляді

$$\mathbf{P}_e \vec{i} = 0; \quad (1)$$

$$\mathbf{G}_e (\mathbf{M} d\vec{i} / dt + \mathbf{L}_s d\vec{i} / dt + \mathbf{R} \vec{i}) = \mathbf{G}_e \vec{u} , \quad (2)$$

де $\mathbf{P}_e, \mathbf{G}_e$ – перша й друга матриці інцидентій електричних кіл статора та ротора; $\mathbf{M} = \partial \bar{\Psi} / \partial \bar{\mathbf{i}}$ – матриця ДЕМП; $\bar{\mathbf{i}}$ – вектор-стовпець струмів фаз статора, обвиток збудження та поздовжньо-поперечних контурів ротора; $\bar{\mathbf{u}}$ – вектор-стовпець напруг; \mathbf{R} – діагональна матриця відповідних резистансів обвиток; \mathbf{L}_s – діагональна матриця індуктивностей розсіювання обвиток в лобових частинах машини.

Для асинхронізованого турбогенератора (АСТГ) матриця ДЕМП має вигляд

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \partial \Psi_a / \partial i_a & \partial \Psi_a / \partial i_b & \partial \Psi_a / \partial i_c & \partial \Psi_a / \partial i_{fd} & \partial \Psi_a / \partial i_{fq} & \partial \Psi_a / \partial i_d & \partial \Psi_a / \partial i_q \\ \partial \Psi_b / \partial i_a & \partial \Psi_b / \partial i_b & \partial \Psi_b / \partial i_c & \partial \Psi_b / \partial i_{fd} & \partial \Psi_b / \partial i_{fq} & \partial \Psi_b / \partial i_d & \partial \Psi_b / \partial i_q \\ \partial \Psi_c / \partial i_a & \partial \Psi_c / \partial i_b & \partial \Psi_c / \partial i_c & \partial \Psi_c / \partial i_{fd} & \partial \Psi_c / \partial i_{fq} & \partial \Psi_c / \partial i_d & \partial \Psi_c / \partial i_q \\ \partial \Psi_{fd} / \partial i_a & \partial \Psi_{fd} / \partial i_b & \partial \Psi_{fd} / \partial i_c & \partial \Psi_{fd} / \partial i_{fd} & \partial \Psi_{fd} / \partial i_{fq} & \partial \Psi_{fd} / \partial i_d & \partial \Psi_{fd} / \partial i_q \\ \partial \Psi_{fq} / \partial i_a & \partial \Psi_{fq} / \partial i_b & \partial \Psi_{fq} / \partial i_c & \partial \Psi_{fq} / \partial i_{fd} & \partial \Psi_{fq} / \partial i_{fq} & \partial \Psi_{fq} / \partial i_d & \partial \Psi_{fq} / \partial i_q \\ \partial \Psi_d / \partial i_a & \partial \Psi_d / \partial i_b & \partial \Psi_d / \partial i_c & \partial \Psi_d / \partial i_{fd} & \partial \Psi_d / \partial i_{fq} & \partial \Psi_d / \partial i_d & \partial \Psi_d / \partial i_q \\ \partial \Psi_q / \partial i_a & \partial \Psi_q / \partial i_b & \partial \Psi_q / \partial i_c & \partial \Psi_q / \partial i_{fd} & \partial \Psi_q / \partial i_{fq} & \partial \Psi_q / \partial i_d & \partial \Psi_q / \partial i_q \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{afd} & M_{afq} & M_{ad} & M_{aq} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} & M_{bfd} & M_{bfq} & M_{bd} & M_{bq} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c & M_{cfd} & M_{cfq} & M_{cd} & M_{cq} \\ M_{fda} & M_{fdb} & M_{fdc} & L_{fd} & M_{fdfq} & M_{fdd} & M_{fdq} \\ M_{fqa} & M_{fqb} & M_{fqc} & M_{fqfd} & L_{fq} & M_{fqd} & M_{fqq} \\ M_{da} & M_{db} & M_{dc} & M_{dfd} & M_{dfq} & L_d & M_{dq} \\ M_{qa} & M_{qb} & M_{qc} & M_{qfd} & M_{qfq} & M_{qd} & L_q \end{pmatrix}. \quad (3)$$

де $L_a, L_b, L_c, L_{fd}, L_{fq}, L_d, L_q$ – диференційні індуктивності обвиток фаз статора, обвиток збудження та обвиток, що еквівалентують струми масиву ротора АСТГ; $M_{ab} - M_{dq}$ – диференційні взаємні індуктивності відповідних обвиток.

Для синхронного турбогенератора (СТГ) розмірність матриці \mathbf{M} на одиницю менша через наявність лише однієї обвитки збудження.

Для визначення матриці ДЕМП (3) використовуємо модель магнетного кола неявнополісної машини. У розроблених моделях магнетна система машини апроксимується кільцевим планарним магнетним колом [1, 2, 3]. Зосереджені магнетні опори такого кола еквівалентують елементарні об'єми, на які розбивається весь простір машини. Вебер-амперні характеристики цих об'ємів визначаються на підставі геометричних параметрів та характеристики основної кривої намагнення матеріалу магнетопроводу.

Матрицю \mathbf{M} визначаємо через контурні магнетні потоки

$$\mathbf{M} = \partial \bar{\Psi} / \partial \bar{\mathbf{i}} = \mathbf{W} \partial \bar{\Phi}_k / \partial \bar{\mathbf{i}}. \quad (4)$$

де \mathbf{W} – матриця витків елементарних контурів магнетного кола електричної машини; $\bar{\Phi}_k$ – вектор-стовпець контурних магнетних потоків;

Матриця кількості витків елементарних контурів \mathbf{W} є динамічною. Враховуючи, що розподіл намагнечувальних сил обвиток має східчасто-трапецієподібну форму, нами запропоновано алгоритм визначення елементів матриці \mathbf{W} на кожному кроці інтегрування [2]. Загалом вони

залежать від координати обертання ротора γ . Розмірність матриці $\partial\vec{\Phi}_k / \partial\vec{i}$ визначається кількістю контурів планарного магнетного кола та кількістю витків (струмів). Для обчислення елементів цієї матриці використаємо модель магнетного кола, яку описано у контурних координатах системою скінченних нелінійних рівнянь

$$\Gamma_m \vec{F}(\Phi_k) = \mathbf{W}_t \vec{i}, \quad (5)$$

де $\Gamma_m - q \times s \times p_m$ -вимірний друга матриця інцидентій магнетного кола (тут $q \times s$ – розмір сітки схеми магнетного кола; p_m – кількість ребер графа магнетного кола); $\vec{F}(\Phi)$ – p_m -вимірний вектор-стовпець спадів магнетних напруг віток;

Продиференціювавши (5), одержуємо

$$\Gamma_m \partial\vec{F} / \partial\vec{\Phi} \partial\vec{\Phi} / \partial\vec{i} = \mathbf{W}_t,$$

де $\partial\vec{F} / \partial\vec{\Phi}$ – діагональна матриця диференційних магнетних опорів віток магнетного кола неявнополюсної машини.

Враховуючи, що $\vec{\Phi} = \Gamma_{m,t} \vec{\Phi}_k$, маємо

$$\Gamma_m \partial\vec{F} / \partial\vec{\Phi} \Gamma_{m,t} \partial\vec{\Phi}_k / \partial\vec{i} = \mathbf{W}_t. \quad (6)$$

Тут матриця $\Gamma_m \partial\vec{F} / \partial\vec{\Phi} \Gamma_{m,t}$ є матрицею контурних диференційних магнетних опорів електричної машини $\mathbf{R}_{m,k}$. З рівняння (6)

$$\partial\vec{\Phi}_k / \partial\vec{i} = \mathbf{R}_{m,k}^{-1} \mathbf{W}_t.$$

Тоді за (4)

$$\mathbf{M} = \mathbf{W} \partial\vec{\Phi}_k / \partial\vec{i} = \mathbf{W} \mathbf{R}_{m,k}^{-1} \mathbf{W}_t. \quad (7)$$

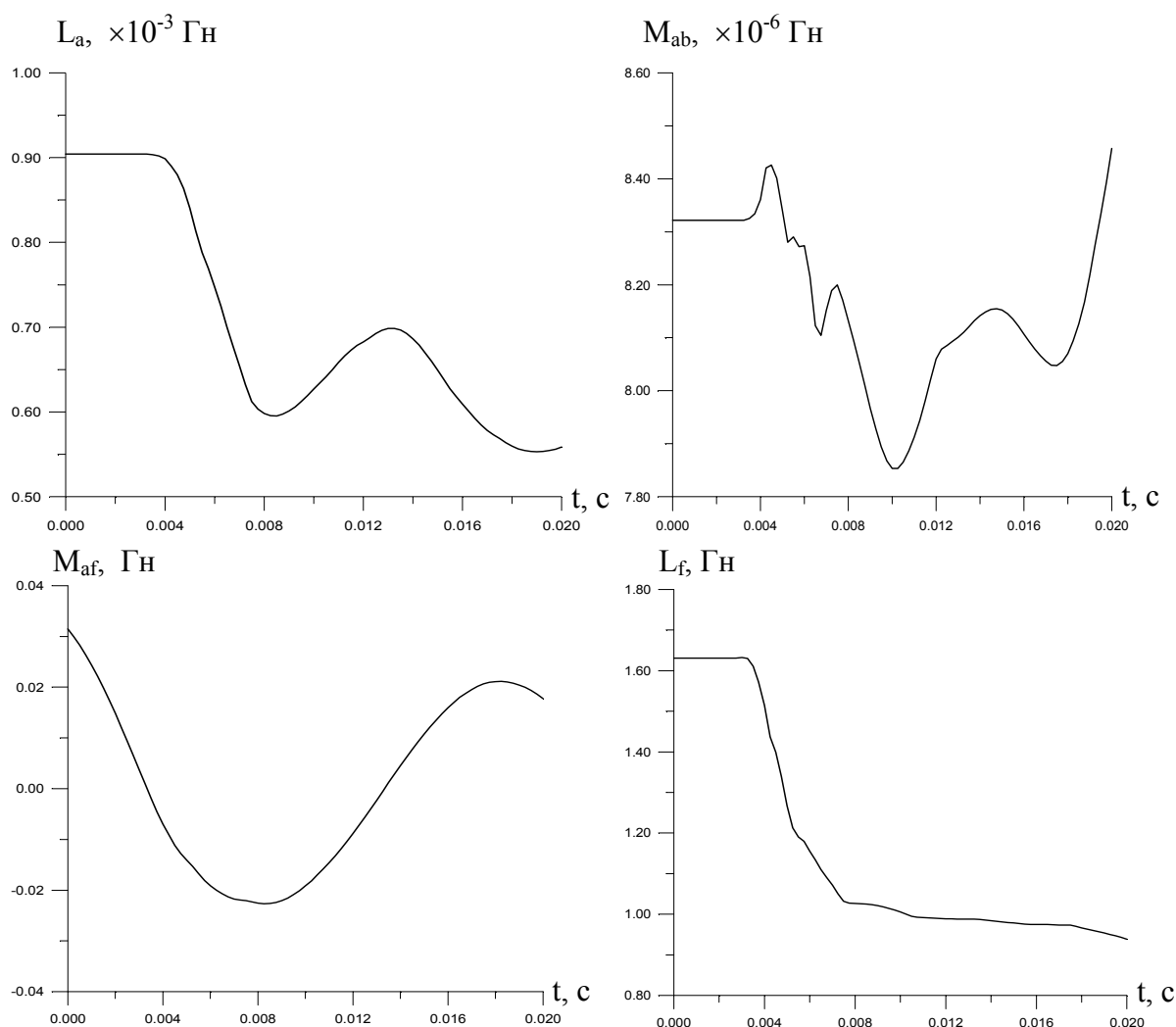
Зрозуміло, що визначення матриці ДЕМП за виразом (7) є недоцільним у зв'язку з обертанням високовимірної матриці $\mathbf{R}_{m,k}$. Тому за рівнянням (6) спочатку знаходимо $\partial\vec{\Phi}_k / \partial\vec{i}$, а потім за (4) матрицю \mathbf{M} . Для розв'язання матричного рівняння (6) необхідно його розділити на матрично-векторні рівняння

$$\mathbf{R}_{m,k} \partial\vec{\Phi}_k / \partial i_j = \vec{w}_{t,j}, \quad (8)$$

де i_j – струм j -ї обвитки неявнополюсної машини; $\vec{w}_{t,j}$ – вектор-стовпець матриці \mathbf{W}_t , який відповідає j -й обвитці.

Враховуючи особливості матриці $\mathbf{R}_{m,k}$ (вона є діагонально-стрічковою) для розв'язування рівняння (8) нами застосовано оптимізований алгоритм узагальненого методу Гаусса.

У цифровій моделі неявнополюсної машини нами розроблено окремий модуль визначення ДЕМП. Необхідні для цього геометричні параметри та фізичні характеристики машини подано у модулі вхідних даних, а струми віток і координати обертання ротора визначаються у модулі інтегрування. На такій цифровій моделі проведено математичні експерименти для визначення ДЕМП для різних режимів синхронного та асинхронізованого турбогенераторів. Висліди деяких з них показано на рисунку. Тут показано часові діаграми окремих ДЕМП для ТГВ-200 в неробочому режимі при лінійному зростанні струму збудження від нуля до номінального значення.



Часові діаграми диференційних електромагнетних параметрів ТГВ-200

Висновки. Запропоновано методику визначення диференційних електромагнетних параметрів у математичних моделях неявнополюсних машин з єдиним магнетним потоком. Такі цифрові моделі з модулем визначення ДЕМП можна використати для аналізу перехідних процесів у системі електропередачі надвисокої напруги, структурними елементами якої є потужні синхронні й асинхронізовані турбогенератори.

1. Перхач В., Скрипник О., Горячко В., Рижий Т. Математична модель асинхронізованого турбогенератора як елемента електропересильні надвисокої напруги // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1998. – Вип. 347. – С. 133–138. 2. Перхач В., Горячко В. Математична та цифрова модель синхронного турбогенератора на основі єдиного магнетного потоку // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 2000. – Вип. 403. – С. 133–141. 3. Горячко В.І. Математичні моделі елементів системи електропередачі: Автореф. ...канд. техн. наук. – Львів, 2002. – 19 с. 4. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с. 5. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. – Львов: Вища шк., 1986. – 164 с. 6. Васьковський Ю. М., Гибель Ю.А. Методи розв'язання коло-польових математичних моделей електромеханічних перетворювачів енергії // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2003. – Вип. 485. – С. 194–201.