Механика Транспорт Комуникации

Научно списание

ISSN 1312-3823

том 11, брой 3, 2013 г.

статия № 0894

http://www.mtc-aj.com

АНАЛИТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИТЕ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАТА „ТЯГОВА МРЕЖА – ЕЛЕКТРИЧЕСКО ТРАНСПОРТНО СРЕДСТВО”

Радка Васева
dorada_bs@abv.bg

ВТУ „Тодор Каблешков”, София, ул. Гео Милев № 158
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: *Математическо моделиране, коефициент на несиносуидалност и мощност, електрически транспортни средства за променлив ток*

Резюме: *Съществуват достатъчно програмни продукти, позволяващи моделиране на устройства от силовата електроника, но те не могат напълно да удовлетворят изискванията, които се поставят към моделите, включващи процеси в силовите електрически вериги на електрически локомотив за променлив ток с определен вид компенсатор за реактивна мощност, при движение по конкретен участък от контактната мрежа (КМ).*

В доклада е направено математическо моделиране на електромагнитните процеси в силовата вериги на ЕТС чрез числено интегриране на система диференциални уравнения, описващи процесите в електрическите и магнитни вериги. Разгледан е конкретен вариант за създаване на математически модел, с помощта на който се изчисляват моментните стойности на тока и напрежението на основните елементи в схемата на разглежданата система. Едновременно с изчисляването на моментните стойности на променливите се определят и интегралните показатели, средна и ефективна стойност на представляващите интерес променливи – активна и реактивна мощност, коефициент на мощност и др.

Графичното представяне на интегралните характеристики се осъществява с използването на графична програма MS Excel. Предлаганата методика позволява да се определят аналитично енергетичните показатели на изследваните ЕТС за променлив ток.

УВОД

Разгледан е вариант за създаване на математически модел, с помощта на който се изчисляват моментните стойности на тока и напрежението на основните елементи в схемата на системата „Тягова мрежа – електрическо транспортно средство”

Това се прави по пътя на числено интегриране на системата от диференциални уравнения, описващи процесите в електрическите вериги.

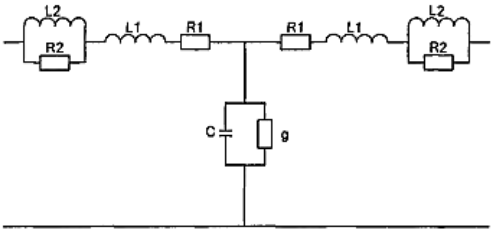
Предлаганата методика позволява да се определят аналитично и енергетичните показатели на изследваните ЕТС за променлив ток. [1,2]

За да се направи цялостно изследване на енергетичните показатели на ЕТС математическия модел „тягова мрежа – ЕТС” трябва да съдържа следните основни елементи:

1. МОДЕЛ НА ТЯГОВАТА ЕНЕРГОСНАБДИТЕЛНА СИСТЕМА (ТЕС)

В общия случай КМ следва да се разглежда като електрическа верига с разпределени параметри. Те представляват модел на крайни елементи, съставени от последователно включени Т-образни четириполюсници, съответстващи на участъци с дължина L(фиг. 1.).

Елементите L_1, R_1, C, определят индуктивността, активното съпротивление, капацитета и напречната активна проводимост на КМ. Паралелно свързаните R_2 и L_2 отчитат възможността за изменение на параметрите на КМ, предизвикани от повърхностни ефекти.



Фиг. 1. Заместваща схема на участък от КМ с дължина l

От фиг. 1 са изведени зависимости за активното и реактивното съпротивление на мрежата:

$$\left.\begin{aligned} R_{KM} &= R_1 + R_2 \frac{\omega^2 . L_2^2}{R_2^2 + (\omega . L_2)^2} \\ X_{KM} &= \omega \left[L_1 + L_2 \frac{R_2^2}{R_2^2 + (\omega . L_2)^2} \right] \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Те могат да бъдат определени и чрез параметрите на участъка от КМ с дължина l от изразите: $R_{KM} = r_0 . l$; $X_{KM} = x_0 . l$. Където r_0, x_0 са съответно активното и реактивното съпротивление за 1 km от КМ, Ω/km.

$$R_{KM} = r_0 . l ; \qquad X_{KM} = x_0 . l \quad (2)$$

Тяговата подстанция може да се представи, във вид на източник на променливо синусоидално напрежение $e_{ТП}$, активното съпротивление $R_{ТП}$ и индуктивното $L_{ТП}$, приведени към напрежението на КМ.

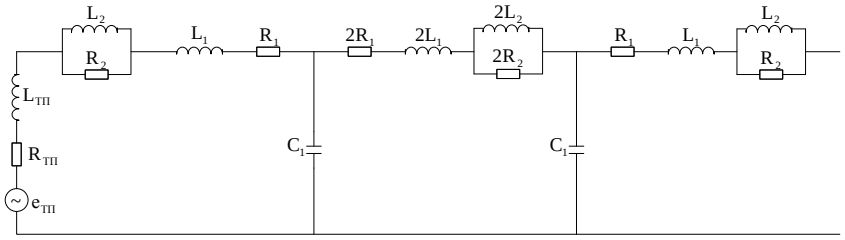
От избран тип трансформатор могат да се дефинират параметрите:

Индуктивно съпротивление на тяговия трансформатор:

$$X_L = \frac{u_k . U_н}{I_н}, \Omega \quad (3)$$

$$L_T = \frac{X_L}{\omega}, mH \quad (4)$$

Пълната заместваща схема е показана на фиг. 4.



Фиг. 4 Заместваща схема на ТЕС

2. МОДЕЛ НА ТЯГОВ ТРАНСФОРМАТОР НА ЕТС($ТТ_Л$)

Електромагнитните процеси в тяговите трансформатори на ЕТС са най-сложни за моделиране, поради специфичното им изпълнение. Известни са два подхода за моделиране на трансформатори. Първи – представяне на трансформатора във вид на електрическа верига с взаимно-индуктивни връзки и активни съпротивления. Втори – представяне на трансформатора като нелинейна магнитна верига със система от намотки, магнитно свързани с различни участъци от магнитната верига.

За постигане на по-прецизни резултати, позволяващи реално отчитане на свойствата на магнитните вериги, моделирането се прави по втория метод.

В този случай за съставяне на разчетната схема на магнитната верига целият магнитопровод се разделя на отделни области (тръби, канали) по посоката на магнитното поле с допускането, че в областта на тези зони потока е равномерен.

Всеки участък от магнитната верига се привежда в съответствие с верига с магнитно съпротивление $R_{\mu i}$, създаващо връзка между изменението на потока Φ_i и пада на магнитното напрежение F_i във вида:

(5) $$F_i = R_{\mu i}.\ \Phi_i$$

Всяка елементарна намотка на магнитната система се създава в съответствие с намотка W_j, потокосцеплението, на която се определя от клоновете на магнитната верига, обхванати от тази намотка.

(6) $$\Psi_j = w_j.\sum \Phi_j$$

Намагнитващата сила F_j се определя от тока I_j на намотката:

(7) $$F_j = W_j.I_j .$$

Магнитния поток Ф в сечението на ядрата и яремите се определя по формулата:

(8) $$\Phi = B.S$$

Площта на напречното сечение на ядрата и яремите се определя по формулата:

(9) $$S = \pi.\frac{d^2}{4}.K_3.K_{кр}$$

Пада на магнитодвижещото напрежение в ядрата и яремите се определя по формулата:

(10) $$F = H.I$$

При определяне на магнитните съпротивления на магнитопровода се отчитат пада на магнитодвижещото напрежение в ядрата и яремите.

Магнитното съпротивление на каналите на разсейване се определят по:

(11) $$R_{\mu i} = \frac{l}{S.\mu_0}$$

За оценка на достоверността на модела получените от моделирането данни са сравнени с аналогични резултати получени по експериментален път от проведении опити на празен ход и късо съединение за изследвания трансформатор на електрически локомотив серия (46-200).

Разликата между паспортните и отчетените стойности за $U_{пх}$ не е по-голям от 0,6 %, за $U_{кс}$ също е незначителна (средно 5,7%).

3. МОДЕЛ НА ПРУ

При серия 46-200 ПРУ за два тягови двигателя представлява два последователно свързани управляеми хибридни изправители схема „Грец". Реализира се последователно плавно изменение на вторичните напрежения U_{21} и U_{22} (двузоново регулиране) към товара

В редица моделиращи програми когато не се прави изследване на параметрите на полупроводниковите елементи (ПЕ) те се представят като идеален ключ.

В зависимост от състоянието на ключа възлите в схемата анод „А" и катод „К" могат да бъдат свързани или не.

Състоянието на ключа се описва с логически променливи:

$$S_{ПЕ} = \begin{cases} 1, \textit{ако ПЕ включен} \\ 0, \textit{ако ПЕ изключен} \end{cases}$$

За управление на ПЕ в процеса на моделиране се използва елемента „блок тиристор" на който се подават логически входни сигнали:

- начално състояние на ПЕ $S_{ПЕ}$;
- посока на напрежението на ПЕ.

$$S_{U_{AK}} = \begin{cases} 1, \textit{ако } U_{AK} \geq 0 \\ 0, \textit{ако } U_{AK} \leq 0 \end{cases}$$

- знака (посоката) на тока през ПЕ

$$S_{I_{AK}} = \begin{cases} 1, \textit{ако } I_{AK} \geq 0 \\ 0, \textit{ако } I_{AK} \leq 0 \end{cases}$$

- управляващ сигнал

$$S_{CY} = \begin{cases} 1, \textit{ако } I_{CY} \geq 0 \\ 0, \textit{ако } I_{CY} \leq 0 \end{cases}$$

Изходните сигнали от крайния елемент са логически сигнали за състоянието на ПЕ ($S_{ПЕ}$) в схемата на ПРУ

4. МОДЕЛ НА БЛОКА ЗА АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ (БАУ) НА ПРУ (БАУПРУ)

В него се моделират част от функциите на реални БАУПРУ, които са необходими за изследване на поставяните задачи. Реализираните функции са следните:

Заданието за интензивността на изменение на тока в ПРУ е изпълнен във вид на апериодично звено от първи порядък и реализира функцията:

$$(12) \qquad I^{**}_{d(p)} = \frac{1}{T_{зир} + 1}.I^{*}_{d(p)}$$

където $I^{*}_{d(p)}$, $I^{**}_{d(p)}$ - зададеното и ограниченото по скорост нарастване на тока;

$T_{зир}$ – времеконстанта на заданието за интензивност.

Регулатора на тока е изпълнен във вид на пропорционално-интегрален регулатор с корекция по смущение и адаптиране към изменението на U_{KM}.

Изходният сигнал на регулатора на ток представлява зададена стойност на напрежението на изхода на ПРУ.

$$(13) \qquad U^{*}_{d} = E_{ТД} + K_{РТ}.\Delta i_d + \frac{1}{T_{РТ}} \int \Delta i_d .dt$$

където ЕТД – напрежение на ТД;

$К_{РТ}$, $Т_{РТ}$ – коефициенти на усилване и времеконстанта на ПИ – регулатора;

$\Delta I_d = I_d^{**} - I_d^*$ - разсъгласуване или регулировъчна грешка.

Изходния сигнал БАУПРУ е управляващо напрежение $U_y=U_d^*$.

Предавателната функция на отворена система за регулиране има вида:

(14) $$W_p(p) = \frac{1}{2.T\mu p(T\mu p + 1)},$$

Тμ=0,005 s – не компенсирана времеконстанта на контура на регулиране на тока.

6. МОДЕЛ НА ТОВАРА

Товара на ПРУ са колекторни ТД, свързани чрез изглаждащи реактори (ИР).

При моделирането на ТД те се представят във вид на електрическа верига, съдържаща еквивалентен източник на е.д.н., активно съпротивление и индуктивност.

Напрежението на тази верига се определя от израза:

(15) $$U_{ТД} = E_d + r_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt}$$

Където: E_d – е.д.н. на ТД;

$r_d = r_{ИР} + 2.r_{ТД}$ - активно съпротивление на изглаждащ реактор и два ТД;

$L_d = L_{ИР} + 2.L_{ТД}$ - индуктивност във веригата на изправения ток;

F – магнитен поток на ТД; v – скорост на движение на ЕТС.

Полученият масив от данни съответства на моментните стойности на токовете и напреженията в отделните елементи на електрическата верига в определен момент от време. От получените данни могат да се определят различни показатели и характеристики за изследваните процеси.

За определяне на основните интегрални показатели съгласно приетия алгоритъм се извършва изчисляване на различни характеристики за определяне на редица показатели на отделните звена, елементи на ПРУ на ЕТС.

Средната стойност на променлива за интервал от време $Т_и$ се определя:

(16) $$X_{ср} = \frac{1}{T_u} \int_t^{t+T_u} x(t)dt$$

Ефективната стойност на променливата се определя от:

(17) $$X = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_t^{t+T_u} x^2(t)dt}$$

Активната мощност през участък от веригата при известни ток и напрежение се определя от:

(18) $$P = \frac{1}{T_u} \int_t^{t+T_u} U(t).i(t)dt$$

Пълната мощност се определя от зависимостта:

(19) $$S=U.I$$

Коефициента на мощност при несинусоидални ток и напрежение се дефинира с формулите:

(20) $$k_м = \frac{P_{(1)}}{S} = \frac{U_{(1)}.I_{(1)}.\cos\varphi_{(1)}}{U_{eff}.I_{eff}}$$, като при $U_{(1)} \approx U_{eff}$,

$$k_{м} = \frac{U_{eff}.I_{(1)}.\cos\varphi_{(1)}}{U_{eff}.I_{eff}} = \nu_{I}.\cos\varphi_{(1)}$$

(21) ,

където: $U_{(1)}$, $I_{(1)}$, $\cos\varphi_{(1)}$ и $P_{(1)}$, са съответно ефективните стойности на напрежението и тока на 1-ви хармоник, ъгълът на дефазиране между тях и активната мощност пренасяна от основния хармоник, W;

За определяне на реактивната мощност се използва израза:

$$Q == \frac{w}{T_{u}} \int_{t}^{t+T_{u}} i(t)\left(\int_{0}^{t} U(t)dt\right)dt \quad (22)$$

Съставящите на пълният ток се определят:

активна - $I_{1a} = \frac{1}{T_{u}} \int_{t}^{t+T_{u}} i_{1}(t)\sin(\omega t)dt$;

реактивна - $I_{1p} = \frac{1}{T_{u}} \int_{t}^{t+T_{u}} i_{1}(t)\cos(\omega t)dt$;

основен хармоник - $I_{1} = \sqrt{I_{1a}^{2} + I_{1p}^{2}}$

където $T_{и} = \frac{1}{f_{c}} = 0{,}02$ s - интервал на изменение, равен на периода на изменение на напрежението в КМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработеният математически модел позволява да се анализират електромагнитните процеси в силовите схеми на етс, по пътя на формиране на система от диференциални уравнения и числено им интегриране по избран метод.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Арков А. С. Върху някои проблеми на управление на тиристорни преобразуватели с естествена комутация. ДС 679 - ЦИНТИ.

[2] Боршуков Е. Икономическа ефективност на изкуствената комутация в тиристорните преобразуватели на електрическия подвижен състав. Сп. Железопътен транспорт, 1987 г.,

[3] Чернева Г. Някои проблеми на управлението на системата токоизправител - импулсен регулатор - тягов двигател в системата за задвижване на ЕМВ за променлив ток. ВВОУ „В.Левски”, сб. Научни трудове, кн.42, 1996 г, стр.85-89

[4] Чернева Г., Н. Стойчева. Ръководство за упражнения по компютърно моделиране и симулация на комуникационна и осигурителна техника. ВТУ,С. 2010 г.

ANALYTICAL STUDY OF THE ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE SYSTEM "TRACTION NETWORK – ELECTRIC VEHIC"

Radka Vaseva
dorada_bs@abv.bg

Todor Kableshkov University of Transport, city of Sofia, 158 Geo Milev str.
BULGARIA

Key words: *Mathematical modeling, coefficient of asinusoidality and power, electric vehicles of alternating current.*

Abstract: *There is a wide range of software products, enabling the modeling of the power electronics devices but they cannot completely satisfy the expectations people have from the models, including processes in the power electric chain of the electric locomotive of alternating current with a particular compensator of reactive power while in motion along a separate section of the contact network (CN).*

The report contains a mathematical modeling of the electromagnetic processes in the power supply chain of electric traction network (ETN) by a numerical integration of a system of differential equations, describing the processes in the electric and magnetic networks. It has been examined a particular variant to create a mathematical model, helping in calculating the moment values of the electric current and the pressure of the basic elements in the scheme of the system into consideration. Apart from the calculation of the moment values of the variables, the purpose is to define the integrated indicators, as well as the middle and effective value of the variables of interest – active and reactive power, the coefficient of power etc.

The graphical presentation of the integral characteristics is being realized using the graphic software program MS Excel. The proposed methodology allows to define the analytic energetic indicators of the electric traction networks of alternating current supply.