Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 621.3.067

DOI: 10.30748/zhups.2020.65.16

О.Є. Зенович, І.М. Ключніков, Є.С. Єлісєєв, О.С. Степанко

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

НЕЛІНІЙНА SIMULINK-МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

Представлена нелінійна математична модель синхронного генератора як об'єкта регулювання напруги. Модель побудована на основі рівнянь Парка-Горєва для ідеалізованого синхронного генератора при припущенні, що перехідні процеси в колах якоря і демпферної обмотки протікають значно швидше, ніж в колі обмотки збудження. У моделі враховується вплив ступеня насичення магнітної системи на індуктивності синхронної машини, що дозволяє досліджувати роботу генератора в контурі регулювання напруги при значних змінах струму збудження і навантаження. Вихідними даними для отримання залежностей індуктивностей від струму збудження є експериментальні характеристики холостого ходу і короткого замикання. Модель синхронного генератора побудована в середовищі імітаційного моделювання MatLab/Simulink. В процесі моделювання порівнювалися моделі синхронного генератора без урахування насичення магнітної системи, з урахуванням впливу насичення тільки на індуктивність обмотки збудження і з повним урахуванням насичення. Отримані результати моделювання показують важливість урахування впливу струму збудження на індуктивності генератора при дослідженні процесів регулювання напруги. Запропонована модель може бути корисна при аналізі роботи системи автоматичного регулювання напруги синхронного генератора для отримання кривих перехідних процесів, наближених до реальних експериментальних даних.

Ключові слова: синхронний генератор, нелінійна математична модель, перехідні процеси, середовище імітаційного моделювання MatLab/Simulink, системи автоматичного регулювання напруги.

Вступ

Постановка проблеми. Проведення аналізу електромагнітних процесів, що протікають в синхронному генераторі, пов'язано з серйозними труднощами, через те, що системи диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси в синхронних генераторах і складених відносно фазних струмів і напруг, містять коефіцієнти, що змінюються періодично (індуктивності і взаємні індуктивності обмоток машини). Рішення таких систем рівнянь навіть з використанням сучасних обчислювальних засобів викликає значні труднощі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час у системах електропостачання змінного струму літальних апаратів (ЛА) застосовуються, як правило, явнополосні синхронні генератори з електромагнітним збудженням [1–3].

На рис. 1 приведена конструктивна схема дво-полосного синхронного генератора. На його роторі 1 розміщені обмотка збудження 4 і короткозамкнута демпферна обмотка 5, а на статорі 2 – трифазна обмотка якоря 3. Магніторушійна сила, що створюється

обмоткою збудження, і відповідний їй потік збудження Φ_f спрямовані вздовж осі полюса d . При обертанні ротора з кутовою швидкістю ω в машині створюється обертове магнітне поле.

У нерухомих фазних обмотках при цьому наводяться електрорушійна сила (ЕРС), обумовлена періодичною зміною їх потокозчеплення.

Рис. 1. Конструктивна схема синхронного генератора

Джерело: розроблено авторами за даними [2, С. 16].

Відповідно до закону електромагнітної індукції вектор ЕРС $\dot{E}$ (наприклад, фази А) відстає на $\pi/2$ від вектору потокозчеплення даної фази $\dot{\Psi} = w\dot{\Phi}_f$,

де w — число витків фазної обмотки. При активно-індуктивному навантаженні в сталому режимі роботи генератора струм $\dot{I}$ відстає по фазі від ЕРС на деякий кут ψ , що визначається параметрами генератора і навантаження. Напруга на навантаженні $\dot{U} = \dot{I}r_n + j\dot{I}x_n$ випереджає струм за фазою на кут $\phi = \arctg \frac{x_n}{r_n}$, де $x_n = \omega L_n$ — індуктивний опір навантаження;

r_n — активний опір навантаження.

Різниця ЕРС і напруги (падіння напруги) $\Delta \dot{U} = \dot{E} - U$ в синхронному генераторі обумовлена:

— реакцією якоря, тобто зміною магнітного потоку машини при протіканні струму якоря, внаслідок чого ЕРС зменшується на величину $\Delta \dot{U}_{ря}$;

— наявністю магнітного потоку розсіювання якоря, еквівалентом якого є падіння напруги $j\dot{I}x_s$ на індуктивному опорі розсіювання якоря $x_s = \omega L_s$ (L_s — індуктивність розсіювання фазної обмотки);

— падінням напруги $\dot{I}r_s$ на активному опорі обмотки якоря r_s .

Останньою складовою падіння напруги зазвичай нехтують через її малість у порівнянні зі складовою, зумовленою дією реакції якоря.

Побудова математичних моделей функціонування синхронного генератора, має враховувати, що явнополюсний ротор (індуктор) володіє різною магнітною провідністю по його поздовжній d і поперечній q осях. Дія реакції якоря в залежності від взаємного положення ротора і обмоток статора проявляється по-різному. Максимальне значення потоку реакції якоря при одному і тому ж значенні МРС відповідає моменту часу, коли вісь ротора d збігається з віссю обмотки статора, а мінімальне — коли ці осі перпендикулярні. У зв'язку з цим системи диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси в синхронних генераторах і складених відносно фазних струмів і напруг, містять коефіцієнти, що змінюються періодично (індуктивності і взаємні індуктивності обмоток машини). Рішення таких систем рівнянь навіть з використанням сучасних обчислювальних засобів викликає значні труднощі [4–9].

Мета статті — розробка математичної моделі синхронного генератора як об'єкта регулювання напруги на основі рівнянь Парка-Горева для ідеалізованого синхронного генератора, яка дозволяє оцінювати вплив ступеня насичення магнітної системи

на індуктивності синхронної машини та досліджувати роботу генератора в контурі регулювання напруги при значних змінах струму збудження і навантаження.

Виклад основного матеріалу

Системи диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси в синхронних генераторах і складених відносно фазних струмів і напруг, містять коефіцієнти, що змінюються періодично (індуктивності і взаємні індуктивності обмоток машини). Рішення таких систем рівнянь навіть з використанням сучасних обчислювальних засобів викликає значні труднощі. Тому для спрощення аналізу процесів в синхронних генераторах розглядають дію реакції якоря по поздовжній і поперечній осях окремо (метод двох реакцій) [1–2]. Метод двох реакцій базується на наступних перетвореннях:

— багатофазний багатополюсний генератор замінюється еквівалентною двополюсною машиною з двома взаємно перпендикулярними обмотками якоря;

— вектори струмів, напруг і потокозчеплення замінюються їх проекціями на взаємно перпендикулярні осі d і q , жорстко пов'язані з осями ротора і обертаються разом з ним з кутовою частотою струму (магнітного поля) ω ;

— проекція падіння напруги $\Delta \dot{U}_{ря}$ на осі d і q ставлять у відповідність еквівалентні індуктивні опору реакції якоря по поздовжній $x_{ad} = \omega L_{ad}$ і поперечній $x_{aq} = \omega L_{aq}$ осях з умови

$$\begin{aligned}\Delta U_{ряq} &= I_d x_{ad}; \\ \Delta U_{ряд} &= I_q x_{aq},\end{aligned}\quad (1)$$

де L_{ad} — індуктивності обмоток якоря при таких положеннях ротора, коли вісь обмотки збігається з осями d і q .

При цьому повна система рівнянь Парка-Горева, що описують перехідні і сталі процеси в генераторах змінного струму при симетричному навантаженні, містить п'ять диференціальних рівнянь напруг для відповідних кіл машини і п'ять алгебраїчних рівнянь потокозчеплення:

$$\begin{aligned}U_d &= -I_d r_s - \frac{d\Psi_d}{dt} + \omega \Psi_q; \\ U_q &= -I_q r_s - \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d; \\ U_f &= I_f r_f - \frac{d\Psi_f}{dt}; \\ 0 &= -I_{Dd} r_D + \frac{d\Psi_{Dd}}{dt}; \\ 0 &= -I_{Dq} r_D + \frac{d\Psi_{Dq}}{dt};\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}
\Psi_d &= I_d L_d + I_{Dd} M_{Dd} - I_f M_{fd}; \\
\Psi_q &= I_q L_q + I_{Dq} M_{Dq}; \\
\Psi_f &= I_f L_f + I_d M_{df} - I_{Dd} M_{Df}; \\
\Psi_{Dd} &= I_{Dd} L_{Dd} + I_d M_{dD} - I_f M_{fD}; \\
\Psi_{Dq} &= I_{Dq} L_{Dq} + I_q M_{qD}.
\end{aligned} \quad (2)$$

де U_d, U_q, I_d, I_q – поточні величини амплітудних значень проекцій напруг і струмів в статорних контурах;

I_f, I_{Dd}, I_{Dq} – поточні (миттєві) значення струму збудження і проекцій струмів в демпферній обмотці;

r_s, r_D, r_f – активні опори статорних і демпферної обмоток, опір кола обмотки збудження;

$L_d = L_{ad} + L_s, L_q = L_{aq} + L_s$ – власні індуктивності обмоток статора;

L_d, L_q – власні індуктивності демпферної обмотки по відповідних осях d і q ;

L_f – індуктивність обмотки збудження;

M – взаємні індуктивності відповідних статорних і роторних контурів по осях d і q .

Перехід від проекцій струмів і напруг на осі d і q до їх фізичних значень здійснюють за формулами:

$$\begin{aligned}
U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}; \\
I &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2}; \\
I_D &= \sqrt{I_{Dd}^2 + I_{Dq}^2}.
\end{aligned} \quad (3)$$

Для обліку фазових співвідношень між струмом і напругою використовують формули:

$$\begin{aligned}
\psi &= \arctg \frac{I_d}{I_q}; \\
\psi - \phi &= \arctg \frac{U_d}{U_q}.
\end{aligned} \quad (4)$$

Система рівнянь (2) – (4) не містить періодичних коефіцієнтів, що є функціями кута повороту ротора генератора, що обумовлює її широке використання для дослідження перехідних і сталих процесів в синхронних генераторах. Напруга $U(t)$ і струм $I(t)$, що отримуються в результаті її рішення, відповідно до виразів (3), являють собою функції, що огибають миттєві значення напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ навантаження.

Як показують результати досліджень, для аналізу процесів регулювання напруги систему рівнянь (2) – (4) можна істотно спростити, якщо врахувати, що перехідні процеси в колах якоря і демпферної обмотки протікають значно швидше, ніж в колі обмотки збудження [9].

У зв'язку з цим будемо вважати, що:

– перехідні процеси в колі якоря при зміні провідності навантаження відсутні, тобто

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = 0; \quad (5)$$

– демпферна обмотка відсутня;

– навантаження генератора симетричне.

Крім того будемо нехтувати активним опором обмоток якоря r_s .

При зазначених припущеннях для синхронного генератора можна записати спрощену систему рівнянь Парка-Горєва в наступному вигляді:

– для кола якоря:

$$\begin{aligned}
U_d &= I_q x_q; \\
U_q &= E - I_d x_d; \\
E &= \omega \Psi_{fd},
\end{aligned} \quad (6)$$

де $\Psi_{fd} = w \Phi_f M_{fd}$ – потокозчеплення обмотки якоря з потоком збудження $\Phi_f = \Phi_f(I_f)$;

$x_d = \omega L_d$, $x_q = \omega L_q$ – повні індуктивні опори машини;

– для кола збудження:

$$U_f = I_f R_f + \frac{d}{dt}(I_f L_f), \quad (7)$$

де $R_f = R_p + r_f$ – загальний опір кола обмотки збудження, що дорівнює сумі опорів виконавчого органу регулятора напруги R_p і обмотки збудження r_f ;

– для кола навантаження:

$$\begin{aligned}
U_d &= I_d r_n - I_q x_n; \\
U_q &= I_d x_n + I_d r_n,
\end{aligned} \quad (8)$$

де r_n, x_n – активний і індуктивний опори навантаження.

З рівнянь (6) – (8) з урахуванням (3) можна отримати вираз для напруги генератора U у вигляді:

$$U = \frac{\sqrt{x_n^2 + r_n^2} \cdot \sqrt{(x_q + x_n)^2 + r_n^2}}{(x_d + x_n) \cdot (x_q + x_n) + r_n^2} \cdot E = C \cdot E. \quad (9)$$

Коефіцієнт C залежить від параметрів генератора, від кутової швидкості ω , а також від величини і характеру навантаження і ступеня насичення магнітної системи. Таким чином, синхронний генератор як об'єкт регулювання напруги з урахуванням прийнятих припущень описується системою нелінійних рівнянь:

$$\begin{aligned}
U &= C \cdot E; \\
U_f &= I_f R_f + \frac{d}{dt}(I_f L_f).
\end{aligned} \quad (10)$$

Нелінійність рівнянь (10) обумовлена тим, що:

– коефіцієнт C , як це видно з рівняння (9), є нелінійною функцією опорів генератора і навантаження і кутової швидкості, індуктивні опори генератора залежать від ступеня насичення магнітної системи;

– ЕРС E та індуктивність обмотки збудження L_f є нелінійними функціями струму збудження внаслідок насичення магнітної системи генератора.

Подальше спрощення моделі генератора зазвичай передбачає лінеаризацію рівнянь (10) до деякого усталеного режиму роботи генератора, що характеризується усталеними значеннями кутової швидкості, опорів навантаження і генератора, напруги збудження, опору збудження і відповідними значеннями індуктивності і струму збудження, ЕРС і напруги генератора. Такий підхід до аналізу процесів в генераторі правомірний лише для малих змін струмів в обмотках генератора і кутової швид-

кості обертання, тому що індуктивні опори машини залежать від ступеня насичення магнітної системи і швидкості обертання.

В даний час існують пакети прикладних програм (наприклад, Matlab/Simulink, LabVIEW/Control Design and Simulation), що дозволяють моделювати складні динамічні системи, в тому числі описувані нелінійними диференціальними рівняннями [10–12].

Для моделювання синхронного генератора як об'єкта регулювання напруги в середовищі MatLab/Simulink пропонується схема, яка представлена на рис. 2.

Рис. 2. Simulink модель синхронного генератора

Джерело: розроблено авторами.

Блок 2-D Lookup Table задає в табличній формі ЕРС генератора E як функцію частоти f і струму збудження I_f . Для формування таблиці використовувалися експериментальні характеристики холо-

стого ходу генератора, зняті при зміні струму збудження і частоти в експлуатаційному діапазоні (табл. 1).

Таблиця 1

Експериментальні характеристики холостого ходу генератора, зняті при зміні струму збудження і частоти в експлуатаційному діапазоні

$f, \text{Гц}$	$I_f, \text{А}$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
365	0	34,38	71,23	107,3	140	168,9	190,3	204,2	214,3	221,4	227,2
400	0	37,65	78,29	117,6	153,3	185	208,2	223,7	234,8	242,5	248,9
415	0	39,09	81,01	122,1	159,2	192	216,3	232,3	243,8	251,9	258,4

Джерело: розроблено авторами.

У блоці Subsystem 1 (рис. 3) розраховується струм збудження I_f шляхом чисельного рішення диференційного рівняння (10).

Вхідними параметрами тут є напруга збудження U_f і опір кола обмотки збудження R_f .

Блок 1-D Lookup Table задає в табличній формі індуктивність обмотки збудження L_f як функцію струму збудження I_f (табл. 2).

Рис. 3. Модуль розрахунку струму збудження Subsystem

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2

Значення індуктивності обмотки збудження L_f як функції струму збудження I_f

Показник	I_f, A										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L_f, \text{Гн}$	2,15	2,15	2,05	1,87	1,6	1,3	0,99	0,78	0,64	0,58	0,55

Джерело: розроблено авторами.

В блоці Subsystem2 (рис. 4) розраховується коефіцієнт C (9). Вхідними параметрами для розрахунку є струм збудження I_f , частота f , активний опір r_n та індуктивність L_n навантаження.

Блоки 1-D Lookup Table1 і 1-D Lookup Table2

задають в табличній формі індуктивності L_d, L_q як функції струму збудження I_f (табл. 3).

Значення індуктивностей розраховані за характеристиками холостого ходу і короткого замикання [3].

Рис. 4. Модуль розрахунку коефіцієнта C Subsystem2

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3

Значення індуктивності обмотки збудження L_d, L_q як функції струму збудження I_f

Показник	L_d, L_q, A										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L_d, \text{Гн}$	0,0072	0,0072	0,0071	0,0069	0,0066	0,0062	0,0057	0,0051	0,0045	0,0039	0,0034
$L_q, \text{Гн}$	0,0036	0,0036	0,0035	0,0034	0,0033	0,0031	0,0028	0,0025	0,0022	0,0019	0,0017

Джерело: розроблено авторами.

Дана модель була використана при дослідженні процесів регулювання напруги синхронного генератора за допомогою малоінерційного регулятора напруги. На рис. 5 представлені перехідні процеси регулювання напруги при включенні потужного навантаження: 1 – без урахування насичення магнітної системи, 2 – з урахуванням впливу насичення тільки на індуктивність обмотки збудження, 3 – з повним ура-

хуванням насичення. При повному урахуванні насичення перехідний процес практично ідентичний до результатів, отриманих за допомогою моделі SI Fundamental Synchronous Machine, що використовується в MatLab/Simulink/Power Systems, і в якій моделювання здійснюється шляхом чисельного рішення рівнянь (2) з урахуванням прийнятих припущень.

Рис. 5. Перехідні процеси регулювання напруги
Джерело: розроблено авторами.

Висновки

В роботі представлена нелінійна математична модель синхронного генератора як об'єкта регулювання напруги, яка побудована на основі рівнянь Парка-Горєва для ідеалізованого синхронного генератора при припущенні, що перехідні процеси в колах якоря і демпферної обмотки протікають значно швидше, ніж в колі обмотки збудження. Модель дозволяє враховувати вплив ступеня насичення магнітної системи на індуктивності синхронної машини, що дозволяє досліджувати роботу генератора в контурі регулювання напруги при значних змінах струму збудження і навантаження.

Вихідними даними для отримання залежностей індуктивностей від струму збудження є експериментальні характеристики холостого ходу і короткого замикання.

Запропонована модель може бути застосована при аналізі роботи систем регулювання напруги синхронного генератора для отримання кривих перехідних процесів, наближених до реальних експериментальних даних. Крім того, дана модель може бути використана при створенні віртуальних приладів для перевірки регуляторів напруги в середовищі LabVIEW.

Список літератури

1. Melkebeek Jan A. Electrical Machines and Drives Fundamentals and Advanced Modelling [Electronic resource] / Jan A. Melkebeek. – Springer, 2018. – 734 p. – Available at: <https://www.springer.com/de/book/9783319727295>.
2. Антонов А.Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. Основы теории и синтез: монография / А.Е. Антонов. – К.: ИЭД НАНУ, 2011. – 216 с.
3. Мартинюк В.С. Авіаційні електричні машини та апарати / В.С. Мартинюк. – К.: НАУ, 2012. – 156 с.
4. On detailed synchronous generator modeling for massively parallel dynamic state estimation / Karimipour, Hadis; Dinavahi, Venkata // North American Power Symposium. – 2014. – № 12. – P. 125-138. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2014.6965417>.
5. Brezovec M. Detailed mathematical and simulation model of a synchronous generator / M. Brezovec, I. Kuzle, M. Krpan // Energija. – 2015. – № 64(102). – P. 204-2015.
6. Accelerated state-variable modeling of synchronous machine-converter systems / Liewi Wang, Ali Davoudi, Juri Jatskevich, Patrick L. Chapman // IEEE International Symposium "Circuits and Systems". – 2008. – P. 3037-3040.
7. Driesen J. Virtual synchronous generators / J. Driesen, K. Visscher // in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting-Conversion and Delivery of Electrical energy in the 21st Century, Jul.2008. – P. 11-13. – Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Accelerated-state-variable-modeling-of-synchronous-Wang-Davoudi/3f0dd1647106c7895fab41ef8f4cec49ab6cc763>.
8. Крылова И.А. Модель синхронного генератора с учетом насыщения магнитной цепи в среде matlab/simulink для исследования автоматических регуляторов / И.А. Крылова, Б.В. Кавалеров, Е.А. Чабанов // Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 24. – С. 28-37.
9. Зонтов В.М. Системы электроснабжения летательных аппаратов / В.М. Зонтов., Б.В. Куприн. – М.: ВВИА, 1988. – 183 с.
10. Matlab & Simulink Simscape Electrical: User's Guide [Electronic resource]. – Electronics, Mechatronics, and Power Systems. – 2018. – 334 p. – Available at: <https://www.twirpx.com/file/2716795/>.
11. Липай Б.Р. Компьютерные модели электромеханических систем. Модели основных компонентов электромеханических систем / Б.Р. Липай, С.И. Маслов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2017. – 191 с.
12. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Надійшла до редколегії 22.05.2020
Схвалена до друку 14.07.2020

Відомості про авторів:**Зенович Олександр Євгенович**

кандидат технічних наук доцент
доцент кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9982-2674>

Клюшніков Ігор Миколайович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9419-7825>

Слісєєв Євгеній Станіславович

старший викладач кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0953-4397>

Степанко Олег Степанович

старший викладач кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2573-2067>

Information about the authors:**Oleksandr Zenovych**

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer of the Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9982-2674>

Igor Kliushnikov

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Leader Research
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9419-7825>

Evgeniy Eliseev

Senior Instructor of the Department of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0953-4397>

Oleg Stepanko

Senior Instructor of the Department of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2573-2067>

НЕЛИНЕЙНАЯ SIMULINK-МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

А.Е. Зенович, И.Н. Клюшников, Е.С. Слісєєв, О.С. Степанко

В данной статье представлена нелинейная математическая модель синхронного генератора как объекта регулирования напряжения. Модель построена на основе уравнений Парка-Горева для идеализированного синхронного генератора при предположении, что переходные процессы в цепях якоря и демпферной обмотке протекают значительно быстрее, чем в цепи обмотки возбуждения. В модели учитывается влияние степени насыщения магнитной системы на индуктивности синхронной машины, что позволяет исследовать работу генератора в контуре регулирования напряжения при значительных изменениях тока возбуждения и нагрузки. Модель синхронного генератора построена в среде имитационного моделирования MatLab/Simulink. Полученные результаты моделирования показывают важность учета влияния тока возбуждения на индуктивности генератора при исследовании процессов регулирования напряжения и могут быть полезны при анализе работы системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора.

Ключевые слова: синхронный генератор, нелинейная математическая модель, переходные процессы, среда имитационного моделирования MatLab / Simulink, системы автоматического регулирования напряжения.

NONLINEAR SIMULINK-MODEL OF SYNCHRONOUS GENERATOR AS A VOLTAGE REGULATION OBJECT

O. Zenovych, I. Kliushnikov, E. Eliseev, O. Stepanko

The nonlinear mathematical model of a synchronous generator as an object of voltage regulation is presented. The model is based on the Park-Gorev equations for an idealized synchronous generator under the assumption that transients in the armature circuits and the damper winding proceed much faster than in the field winding circuit. The model takes into account the influence of the degree of saturation of the magnetic system on the inductance of the synchronous machine, which allows us to study the operation of the generator in the voltage control loop with significant changes in the excitation current and load. The initial data for obtaining the dependences of the inductances on the excitation current are the experimental characteristics of idling and short circuit. The synchronous generator model was built in the simulation environment MatLab / Simulink and was used to study the voltage regulation processes of a synchronous generator using a low-inertia voltage regulator. An analysis of the results showed that, with full saturation taken into account, the transient is almost identical to the results obtained using the SI Fundamental Synchronous Machine model used in MatLab / Simulink / Power Systems, in which modeling is performed by numerically solving the equations. During the simulation, models of a synchronous generator were compared without taking into account the saturation of the magnetic system, taking into account the influence of saturation only on the inductance of the field winding and taking into account the full saturation. The obtained simulation results show the importance of taking into account the influence of the excitation current on the generator inductance in the study of voltage regulation processes. The proposed model can be useful in analyzing the operation of a system for automatic voltage regulation of a synchronous generator to obtain transient curves close to real experimental data.

Keywords: synchronous generator, non-linear mathematical model, transients, simulation environment MatLab / Simulink, automatic voltage control systems.