

УДК 622.995; 621.36(083)

УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГИБРИДНОЙ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Г. К. Кохреидзе, Д. П. Лаошвили, Г. Г. Мурджикнели, И. А. Курашвили, Ш. А. Пхакадзе

Грузинский технический университет

Научно-инженерный центр электроэнергетики

ул. М. Цинамдзгвришвили, 68, Тбилиси, 0102, Грузия. E-mail: gmngkf@mail.ru

Предлагается управление и оптимизация режимов единой преобразовательной системы на основании составления уравнения переменных состояния и получения структурных схем компьютерной модели переходных процессов режимов в обобщенных нечетных и четных интервалах времени. Установлены обобщенные нечетные и четные интервалы времени на основании законов переключения транзисторных модулей преобразователя постоянного тока и трехфазного инвертора. Проведено исследование устойчивости режимов единой преобразовательной системы по усовершенствованию критерия Рауса.

Ключевые слова: структурная схема, компьютерное моделирование, обобщенные интервалы, передаточная функция, устойчивость.

УПРАВЛІННЯ Й ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ГИБРИДНОЇ АВТОНОМНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ І МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Г. К. Кохреїдзе, Д. П. Лаошвілі, Г. Г. Мурджікнелі, І. А. Курашвілі, Ш. А. Пхакадзе

Грузинський технічний університет

Науково-інженерний центр електроенергетики

вул. М. Цинамдзгврїшвілі, 68, Тбілісі, 0102, Грузія. E-mail: gmngkf@mail.ru

Пропонується управління та оптимізація режимів єдиної перетворювальної системи на підставі складання рівнянні змінних стану й отримання структурних схем комп'ютерної моделі перехідних процесів режимів в узагальнених непарних і парних інтервалах часу. Встановлено узагальнені непарні й парні інтервали часу на підставі законів перемикання транзисторних модулів перетворювача постійного струму і трифазного інвертора. Проведено дослідження стійкості режимів єдиної перетворювальної системи щодо удосконалення критерію Рауса.

Ключові слова: структурна схема, комп'ютерне моделювання, узагальнені інтервали, передавальна функція, стійкість.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последнее время улучшение технологии преобразования и применения возобновляемых и нетрадиционных источников энергии в электроэнергетике способствует развитию единой преобразовательной системы (ЕПС), состоящей из солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) на базе солнечных батарей (СБ), преобразователя постоянного тока (ППТ), инвертора напряжения на силовых транзисторах ведомых сетью трехфазного переменного тока (СТПТ).

Важным решающим вопросом является плавное регулирование выходного напряжения СБ с помощью ППТ и устойчивое инвертирование с учетом регулирования угла опережения транзисторов для совместимой работы с СТПТ.

С точки зрения повышения энергетических показателей ЕПС, необходимо осуществление передачи максимальной мощности от СБ, оптимизация режимов ЕПС на основании получения оптимальных значений тока СБ и напряжения на выходе СБ при условии осуществления нулевого значения производной мощности по току.

Исходя из особых требований для устойчивой работы ТИ и ЕПС, необходимо определить эквивалентные параметры единой цепи с учетом обобщенных нечетных и четных интервалов времени, провести математическое и компьютерное моделирование процессов.

Учитывая актуальность проблемы, целесообразным является проведение исследования устойчиво-

сти режимов ЕПС на базе усовершенствования критериев устойчивости по Гурвицу и Раусу.

Целью настоящей работы являются:

- составление принципиальных электрических расчетных схем ЕПС для обобщенных нечетных и четных режимов работы;
- получение тока СБ в обобщенных нечетных и четных интервалах работы ЕПС;
- определение начальных значений фазных токов СТПТ для каждого обобщенных временных интервалов с учетом эквивалентных параметров ЕПС;
- получение интегральных выражений в матричной форме относительно переменных состояния;
- составление передаточной функции ЕПС по току и исследование устойчивости режимов ЕПС.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Установлены топология расчетных схем для обобщенных нечетных и четных режимов работы ЕПС (рис. 1, 2).

Суть управления для нечетных и четных режимов заключается в том, что во всех режимах работы происходит переключение силовых VT1, VT2 транзисторов (ППТ), VT3–VT8 транзисторов ТИ и фаз СТПТ по законам коммутационных функций. На рис.1, 2 показаны величины и параметры: J – фототок, протекающий через $p-n$ переход; I – обратный ток насыщения; I_p – ток в шунтовом сопротивлении солнечного элемента; i – выходной ток солнечного элемента;

$$i^{2n-1}(t_{2n-1}) = -\sqrt{3}U_{mc}\omega c_2 \times \left\{ \left[\omega L_1 \left(\omega c_3 + \frac{1}{2}G_c \right) - I \right]^2 + \left(\frac{1}{2}B_c \omega L_1 \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \times \cos \left(\omega t_{2n-1} + 60^\circ + \arctg \frac{1}{2} \frac{\omega L_1 B_c}{\omega L_1 \left(\omega c_3 + \frac{1}{2}G_c \right) - I} \right) - \frac{L_1 C_2}{\tau_c^2} \left[i_k^{2n-1}(0) + \frac{\sqrt{3}}{4} U_{mc} (B_c - \sqrt{3}G_c) \right] \times e^{-\frac{t_{2n-1}}{\tau_c}}; \quad n=1,2,3,\dots, \quad k=A,B,C; \quad (6)$$

$$i^{2n}(t_{2n}) = -\sqrt{3}U_{mc}\omega c_2 \times \left\{ \left[\omega L_1 (\omega c_3 + G_c) - I \right]^2 + (\omega L_1 B_c)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \times \cos \left(\omega t_{2n} + 90^\circ + \arctg \frac{\omega L_1 B_c}{\omega L_1 (\omega c_3 + G_c) - I} \right) - \frac{L_1 C_2}{\tau_c^2} \left[i_k^{2n}(0) - \frac{\sqrt{3}}{2} U_{mc} G_c \right] e^{-\frac{t_{2n}}{\tau_c}}; \quad k=A,B,C; \quad n=1,2,3,\dots \quad (7)$$

В (6), (7) для активной и реактивной проводимости СТПТ

$$G_c = \frac{R_c}{Z_c^2}; \quad B_c = \frac{\omega L_c}{Z_c^2}. \quad (8)$$

Все эквивалентные параметры, входящие в выражения (1)–(7), определяются через отдельные параметры схемы, показанные на рис. 1, 2.

Для компьютерного моделирования процессов ЕПС составлены системы уравнения переменных состояний. В результате решения этих систем уравнений получены интегральные выражения в матричной форме относительно переменных состояний:

$$|f(t_{2n-1})| = \int_{\lambda(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left\{ (\Delta^{2n-1})^{-1} \times |f_1'(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})| \right\} dt_{2n-1} \quad (9)$$

$n=1,2,3,\dots$

$$|f(t_{2n})| = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} \left\{ (\Delta^{2n})^{-1} \times |f_2'(t_{2n}, u_{mc}^{2n})| \right\} dt_{2n} \quad (10)$$

$n=1,2,3,\dots$

В (9), (10) имеем:

$$[f(t_{2n-1})] = \begin{pmatrix} u_{dc}^{2n-1} \\ u_{c1}^{2n-1} \\ u_{c2}^{2n-1} \\ u_{c3}^{2n-1} \\ i_{L1}^{2n-1} \\ i_k^{2n-1} \end{pmatrix}; \quad [f(t_{2n})] = \begin{pmatrix} u_{dc}^{2n} \\ u_{c1}^{2n} \\ u_{c2}^{2n} \\ u_{c3}^{2n} \\ i_{L1}^{2n} \\ i_k^{2n} \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$n=1,2,3,\dots, \quad k=A,B,C.$

$$[f_1'(t_{2n-1}), u_{mc}^{2n-1}] = \begin{pmatrix} i^{2n-1} \\ i_{VD3}^{2n-1} \\ i_{L1}^{2n-1} \\ i_k^{2n-1} \\ i_{dco}^{2n-1} \\ u_{dc}^{2n-1} \\ U_{mc} \sin(\omega t_{2n-1} + 60^\circ) \end{pmatrix}; \quad n=1,2,3,\dots, \quad k=A,B,C$$

$$[f_2'(t_{2n}), u_{mc}^{2n}] = \begin{pmatrix} i^{2n} \\ i_{L1}^{2n} \\ i_k^{2n} \\ u_{dco}^{2n} \\ u_d^{2n} \\ U_{mc} \sin(\omega t_{2n} + 90^\circ) \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$n=1,2,3,\dots, \quad k=A,B,C.$

$$(\Delta^{2n-1})^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{c_1} & \frac{1}{c_1} & -\frac{1}{c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{c_1} & \frac{1}{c_1} & -\frac{1}{c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{c_2} & \frac{1}{c_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{c_1} \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) & -\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c_3} & -\frac{1}{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_c}{L_c} & 0 & 0 & \frac{\sin 60^\circ}{L_c} \end{pmatrix}$$

$n=1,2,3,\dots,$

$$(\Delta^{2n})^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{c_1} & -\frac{1}{c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{c_1} & -\frac{1}{c_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_3} & -\frac{1}{c_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_c}{L_c} & 0 & 0 & \frac{\sin 60^\circ}{L_c} & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$n=1,2,3,\dots,$

Для программного цифрового моделирования исследуемой ЕПС необходимо составить структурную схему модели переходного процесса ЕПС на основании (9), (10), с учетом наборов моделирующих элементов отдельных элементарных математических операций с выполнением требуемых условий их сопряжения [1].

На основании (9)–(13) построены структурные схемы компьютерной модели переходных процессов нечетных $(2n-1)$ и четных $(2n)$ режимов ЕПС с учетом обобщенных интервалов времени:

$$2(n-1)\pi/6 \leq \omega t_{2n-1} \leq (2n-1)\pi/6, \text{ и}$$

$$(2n-1)\frac{\pi}{6} \leq \omega t_{2n} \leq 2n\frac{\pi}{6}, n = 1, 2, 3, \dots$$

Для исследования устойчивости управления и оптимизаций режимов ЕПС составлена передаточная функция по току:

$$W_i(P) = \frac{I_R(P)}{I(P)} = \frac{L_C}{2L_i R_C C_2} \times \frac{P^2 + A_1 P + A_0}{P^3 + B_2 P^2 + B_1 P + B_0}, K = A, B, C, \quad (14)$$

где в (14) $I_K(P)$, $I(P)$ – операторные изображения по Лапласу токов $i_k (k = A, B, C)$ и i ; коэффициенты A_0, A_1, B_0, B_1, B_2 определяются через известные параметры ЕПС.

Из (14) видно, что исследуемая система имеет характеристический полином:

$$F(P) = P^3 + B_2 P^2 + B_1 P + B_0. \quad (15)$$

По Гурвицу из коэффициентов этого полинома составляется определитель:

$$\Delta_\Gamma = \begin{vmatrix} B_2 & B_0 & 0 \\ 1 & B_1 & 0 \\ 0 & B_2 & B_0 \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Необходимо найти значения всех миноров, начиная с верхнего левого угла и заканчивая значением определителя. Если все они имеют одинаковый знак, то система устойчива – все корни полинома (15) располагаются в левой полуплоскости. В частности, если первый элемент первой строки положителен, то должны быть положительными и все остальные миноры.

Найдем все миноры определителя (16)

$$M1 = B_2 > 0; \quad M2 = \begin{vmatrix} B_2 & B_0 \\ 1 & B_1 \end{vmatrix} = B_1 B_2 - B_0 > 0;$$

$$M3 = \Delta_\Gamma = \begin{vmatrix} B_2 & B_0 & 0 \\ 1 & B_1 & 0 \\ 0 & B_2 & B_0 \end{vmatrix} = B_0(B_1 B_2 - B_0) > 0. \quad (17)$$

Из (17) получаем:

$$B_2 > 0; \quad B_1 B_2 > B_0; \quad B_0 > 0; \quad B_1 > 0. \quad (18)$$

Таким образом, предложенная ЕПС по критерию Гурвица устойчива.

В соответствии с критерием Рауса определитель Гурвица (16) не составляется. Его заменяет таблица, составляемая по следующему правилу [2].

Пусть дан характеристический полином (15).

Составленная по Раусу таблица имеет вид:

$$\begin{array}{l} P^3 \\ P^2 \\ P^1 \\ P^0 \end{array} \left| \begin{array}{lll} 1 & B_1 & 0 \\ B_2 & B_0 & 0 \\ B_1 - \frac{B_0}{B_2} & 0 & 0 \\ B_0 & 0 & 0 \end{array} \right. \quad \text{или}$$

$$\begin{array}{l} P^3 \\ P^2 \\ P^1 \\ P^0 \end{array} \left| \begin{array}{lll} 1 & B_1 & 0 \\ 1 & B_0/B_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{array} \right. \quad (19)$$

В (19) перепишем таблицу Рауса без нулей:

$$\begin{array}{l} P^3 \\ P^2 \\ P^1 \\ P^0 \end{array} \left| \begin{array}{ll} 1 & B_1 \\ 1 & B_0/B_2 \\ 1 & \\ 1 & \end{array} \right. \quad (20)$$

Первая строка состоит из коэффициентов полинома (15), записанных через один, начиная с коэффициента P^3 , а вторая – из оставшихся. При этом вторая сокращена на B_2 . Элемент третьей строки находится по выражению

$$\frac{B_2 B_1 - 1 B_0}{B_2}; \quad \frac{B_2 \cdot 0 - 1 \cdot 0}{B_2}.$$

Разделив эти элементы на $B_1 - \frac{B_0}{B_2}$, получим третью строку: $1; 0; 0$.

Таким же образом находим и элементы четвертой строки:

$$\left[\left(B_1 - \frac{B_0}{B_2} \right) B_0 \right] / \left(B_1 - \frac{B_0}{B_2} \right);$$

$$\left[\left(B_1 - \frac{B_0}{B_2} \right) 0 - B_2 \cdot 0 \right] / \left(B_1 - \frac{B_0}{B_2} \right).$$

Разделим эти элементы на B_0 и получим четвертую строку:

$$1; 0; 0.$$

Во втором столбце знак „минус” отсутствует, следовательно, у полинома (15) нет корней с положительной вещественной частью и предложенная ЕПС устойчива.

ВЫВОДЫ. 1. Рассмотрены управление и оптимизация режимов единой преобразовательной системы на базе возобновляемых источников энергии.

2. Установлены расчетные схемы для обобщенных нечетных и четных режимов ЕПС.

3. Получены обобщенные выражения входного тока ППТ и фазных токов СПТ, справедливые для обобщенных нечетных и четных интервалов времени.

4. Определены все эквивалентные параметры ЕПС.

5. Проведено компьютерное моделирование процессов ЕПС. Для этой цели получены интегральные обобщенные выражения всех электрических величин ЕПС.

6. Проведено исследование устойчивости ЕПС по критерию Гурвица и по Раусу. Установлено, что предложенная ЕПС устойчива при управлении и оптимизации режимов с учетом обобщенных нечетных и четных интервалов времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Регулирование и управление процессов при совместной работе солнечных фотоэлектрических станции и сети переменного тока / Г.К. Кохреидзе, Д.П. Лаошвили, Ш.А. Пхакадзе / Научно-технический журнал „Электротехнические и компьютерные системы”. – К., 2011. – № 03 (79). – С. 371–374.

2. Долбня В.Т. О целесообразности применения определителя Гурвица для проверки устойчивости систем автоматического управления // Научно-технический журнал „Электротехнические и компьютерные системы”. – К., 2011. – № 03 (79). – С. 14–16.

MANAGING AND OPTIMIZING PARALLEL MODE HYBRID ELECTRIC POWER SYSTEMS AND AUTONOMOUS AC

G. Kokhreidze, D. Laoshvili, G. Murjikneli, I. Kurashvili, Sh. Pkhakadze

Georgian Technical University

Electric Power Engineering Research Center

ul. M. Tsinandzgvrvishvili, 68, Tbilisi, 0102, Georgia. E-mail:gmgmgkf@mail.ru

It is proposed management and optimization of a single conversion system based on up the equations of state variables and to obtain structural models of computer circuit transient regimes of generalized odd and even time intervals. Generalized even and odd intervals, under the laws of transistor switching DC converter modules and three-phase inverter. The study stability of the single mode conversion system to improve the Routh criterion.

Key words: block diagram, computer modeling, generalized intervals, the transfer function, stability.

REFERENCES

1. Regulation and administration of processes at time of joint operation of AC power net and photo electronic station of the sun / G.K. Kokhreidze, D.P. Laoshvili, Sh.A. Pkhakadze // *Scientific-technical magazine „Electrotechnical and Computer Systems”*. – K., 2011. № 03 (79). – PP. 371–374. [in Russian],

2. Dolbnya V.T. About Expediency of using of Gurtvitz/s detector for establishment of sustainability of AC power net and photo electronic station of the sun // *Scientific-technical magazine „Electrotechnical and Computer Systems”*. – K., 2011. – № 03 (79). – PP. 14–16. [in Russian]

Стаття надійшла 1.06.2012.
Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Старостіним С.С.