

УДК 622.995;621.36(083)

Г.К. Кохреидзе, канд. техн. наук,
Д.П. Лаошвили, д-р техн. наук,
Ш.А. Пхакадзе

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. Предлагается полная структурная схема преобразовательной системы, состоящей из солнечного элемента, аккумуляторной батареи, преобразователя постоянного тока, инвертора напряжения на транзисторах, ведомого сетью трехфазного переменного тока. Установлены алгоритмы регулирования и управления процессов с применением коммутационных функций электрических величин.

Г.К. Кохреидзе, кандидат технічних наук

Д.П.Лаошвілі, доктор технічних наук

Ш.А. Пхакадзе

УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ПРИ СПІЛЬНІЙ РОБОТІ СОЛЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Аннотація. Пропонується повна структурна схема системи перетворення, до якої входять сонячний елемент, акумуляторна батарея, перетворювач постійного струму, інвертор напруги на транзисторах, відомою мережею трифазного змінного струму. Встановлені алгоритми регулювання і керування процесів з використанням комутаційних функцій електричних величин.

MANAGEMENT SYSTEMS AT THE JOINT OPERATION OF SOLAR PHOTO-VOLTAIC PLANTS AND AC

G. K. Kohreidze, PhD

D. P. Laoshvili, ScD

S. A. Phakadze

Abstract. It is offered the full block diagram of single conversion system of solar cell, an accumulator battery, the direct current conversion. voltage inverter on crystal triode driven by the network of three-phase of alternating current. Algorithms of regulations and managements of processes installed with application of switching function of electrical quantity.

В работе представлено регулирование и управление режимов при совместной работе солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) и сети трехфазного переменного тока (СТПТ) (рис.1) [3,5,7]. Применяется преобразователь постоянного тока (ППТ) (рис. 1,г), который состоит из: транзисторов VT1,2; диодов VD1,2,3; конденсаторов C1,2,3 и L1 дросселя. Трехфазный инвертор (ТИ) (рис.1,д) представляет собой мостовое соединение транзисторов VT3÷VT8, на выходе которого с сети переменного тока (СПТ) получены электромагнитно совместимые фазные напряжения U_A, U_B, U_C и токов i_A, i_B, i_C . На рис. 1,е показаны условные направления фазных токов и напряжения с учетом индуктивностей сети LA, LB, LC и Э.Д.С. e_A, e_B, e_C . ППТ представляет собой недиссипативную буферную цепь [5]. Частота переключения f_0 транзисторов в ППТ в n_0 раз больше частоты СТПТ $f_0=n_0f_c$. Частота переключения транзисторов VT3÷VT8 в ТИ равна f_c . 2,з)

Транзисторы VT1,2 ППТ (рис.2) закрыты от $t=t_0=0$ до $t=t_1$ и от $t=t_2$ до $t=t_3$; открыты от $t=t_1$ до $t=t_2$ и от $t=t_3$ до $t=t_4$. При этом в СПТ от $t=t_0$ до $t=t_2$ ток проходит в А, В фазах, а от $t=t_2$ до $t=t_4$ - в А, С фазах (рис.

На транзисторах VT1,2 импульсы управления $U_{VT1,2}$ подаются согласно чередованию, показанному на рис. 2,б. С такой же частотой происходит процесс заряда и разряда конденсатора C2. Соответствующая коммутационная функция $\rho_{C2}(t)$ токов заряда и разряда конденсатора C2 показана на рис. 2,в.

Верхние положительные прямоугольные импульсы соответствуют существованию зарядного тока конденсатора C2, а отрицательные прямоугольные импульсы – существованию разрядного тока.

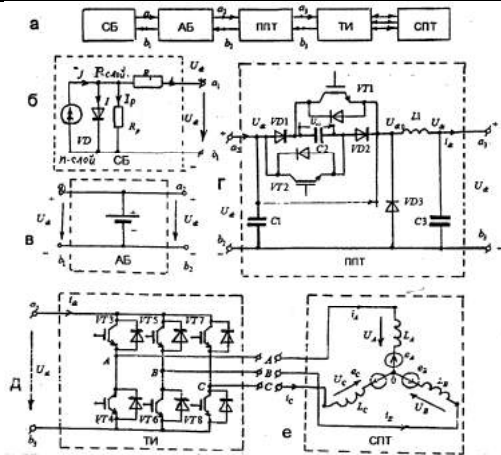


Рис. 1. Структурная (а) и принципиальные электрические схемы элементов единой преобразовательной системы (ЕПС)

При $U_{YVT1,2} = 0$ имеем $\rho_{C2}(t) = 1$, а при $U_{YVT1,2} = 1$ имеем $\rho_{C2}(t) = -1$. Таким образом, $\rho_{C2}(t) = 1-2 U_{YVT1,2}$ и $U_x = U_{dc} \cdot \rho_{C2}(t)$ [3].

Формула напряжения U_{dc0} согласуется с формой коммутационной функции $\Phi(t)$, а его мгновенные значения вычисляются так:

$$U_{dc0} = U_{dc} \cdot \Phi(t) = 2U_{dc} \cdot U_{YVT1,2}.$$

Кроме того, справедливо выражение

$$U_{dc0} = U_{dc} + \rho_{C2}(t) \cdot U_{C2}(t) = U_{dc} \cdot \Phi(t).$$

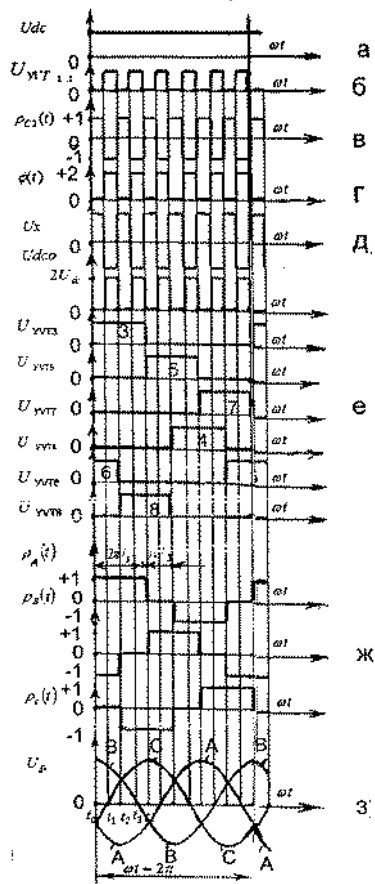


Рис. 2. Волновые диаграммы и коммутационные функции электрических величин ЕПС

В трехфазном инверторе для обеспечения закона переключения транзисторов VT3÷VT8 принимаем соответствующие расположения импульсов управления (рис. 2,е). Закон изменения коммутационных функций $\rho_A(t)$, $\rho_B(t)$, $\rho_C(t)$ фазных токов ТИ показан на рис. 2,ж. Эти коммутационные функции принимают значения единицы в течение $2\pi/3\omega$ времени, а нулевое - в течение $\pi/3\omega$ времени.

Как видно из рис. 1 и 2, в течение одного периода изменения фазных величин СПТ число режимов определяется как: $m_0 = 2n_0$, где n_0 - число переключения транзисторов VT1,2 в течение полупериода изменения фазных величин СПТ. В нашем случае получается $n_0 = 6$; $m_0 = 12$ и $f_0 = 300$ Гц.

Топология расчетных схем для всех нечетных режимов структурно одинакова, фиксируются последовательные соединения VD1,2 диодов и конденсатора C2 (рис. 3,а). Аналогично для всех четных режимов расчетные схемы одинаковы, фиксируются последовательные соединения VT1,2 транзисторов и конденсатора C2 (рис. 3,б). Во всех режимах работы происходит переключение силовых VT3÷VT8 транзисторов СИ и фаз СПТ по законам коммутационных функций $\rho_A(t)$, $\rho_B(t)$, $\rho_C(t)$ (рис. 2,ж).

В результате исследования влияния различных условий на выходные характеристики солнечного элемента в уравнение элемента были включены три дополнительных параметра [4,6]: А, R_S и R_p (рис.1,б)

$$i = J - I \left\{ \exp \left[K_0 (U_{dc} + iR_S) \right] - 1 \right\} - \frac{U_{dc}}{R_p}, \quad (1)$$

где R_S - последовательное сопротивление солнечного элемента; R_p - шунтовое сопротивление солнечного элемента; i - выходной ток солнечного элемента; J - фототок, протекающий через р-п переход; I - обратный ток насыщения; U_{dc} - выходное напряжение солнечного элемента; K - коэффициент Больцмана; T - абсолютная температура; e - заряд электрона; $K_0 = e/AKT$ [1,2], причем А - диодный коэффициент, принимающий значения от 1 до 5, Т - абсолютная температура; e - заряд электрона.

Сумма $U_{dc} + iR_S$ в уравнении (1) представляет собой диодное напряжение U_d , подающееся на самый солнечный элемент. Если направление тока в модели солнечного элемента принять таким, как показано на рис. 1,б, тогда $U_d = U_{dc} + iR_S$. Если же направление тока обратное, то знак в выражении изменится, т.е. $U_d = U_{dc} - iR_S$. Все параметры солнечного элемента изменяются с изменением температуры, интенсивности освещения и степени радиационного повреждения, и очень трудно измерить параметры I, A, R_S, R_p во всех диапазонах.

Из (1) определим

$$U_{dc} = R_p [J - I \{ \exp [K_0 (U_{dc} + R_S i)] - 1 \} - i]. \quad (2)$$

Подставляя в уравнение (1) отдельно $i=0$, $U_{dc} = U_{dc,xx}$ и $U_{dc}=0$, $i=i_{K,3}$, получаем уравнения холостого хода и короткого замыкания, решение которых дает:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{C}{R_p} U_{dc,x}, & J &= \frac{1+cb}{R_p} U_{dc,x} \\ J &= \left(b + \frac{1}{C} \right) I, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $b = -1 + \exp(K_0 U_{dc,xx})$;

$$C = [1 - R_p i_{K3} / U_{dc,xx}] / [\exp(K_0 i_{K3} R_s) - \exp(K_0 U_{dc,xx})]. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (2), после преобразования получаем уравнение вольтамперной характеристики солнечного элемента в относительных единицах [4]:

$$U_{dc}^* + ai^* = b - c \cdot \exp[(U_{dc}^* + i^*)d], \quad (5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a &= R_p / R_s, & d &= K_0 U_{dc,x}, \\ i^* &= i / \frac{U_{dc,x}}{R_s}, & U_{dc}^* &= U_{dc} / U_{dc,x}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

После разложения в ряд Тейлора второго члена правой части уравнения (5), учитывая только первый трехчлен разложения, получим [3]:

$$\begin{aligned} U_{dc}^* (1 + cd + \frac{1}{2} cd^2 U_{dc}^* + cd^2 i^*) &= \\ &= b - c - (a + cd)i^* - \frac{1}{2} cd^2 (i^*)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

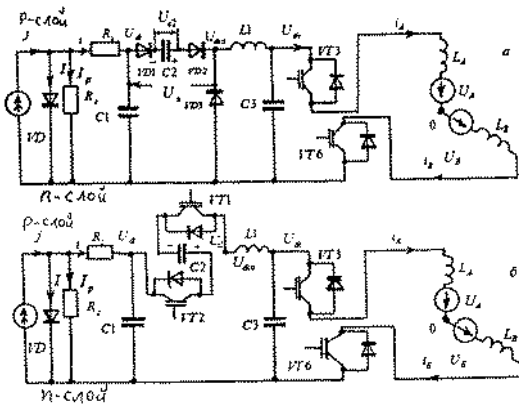


Рис. 3. Топология расчетных схем для нечетных (а) и четных (б) режимов работы единой преобразовательной системы

Из (7) при холостом ходе

$$i^* = 0, \quad U_{dc}^* = 1; \quad (8)$$

при коротком замыкании

$$U_{dc}^* = 0; \quad i_{K3}^* = 1. \quad (9)$$

Решая уравнение (7) относительно U_{dc}^* , для интервала $0 < i^* < i_{K3}^*$

$$\begin{aligned} U_{dc}^* &= \frac{1}{cd^2} \left\{ -[1 + cd(1 + di^*)] \pm \left[[1 + cd(1 + di^*)]^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + 2cd^2 [b - c - (a + cd)i^* - \frac{1}{2} cd^2 (i^*)^2] \right]^{1/2} \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Мощность солнечного элемента:

$$P^* = U_{dc}^* \cdot i^* = \frac{1}{cd^2} \left\{ -i^* [1 + cd(1 + di^*)] \pm i^* \left[(1 + cd + cd^2 i^*)^2 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + 2cd^2 [b - c - (a + cd)i^* - \frac{1}{2} cd^2 (i^*)^2] \right]^{1/2} \right\}. \quad (11)$$

Для упрощения анализа допускаем, что $R_p = R_s$, т.е. $a = 1$.

Из (11) при условии $dP^*/di^* = 0$ получаем уравнение относительно оптимального значения тока нагрузки солнечного элемента i_{onn}^* :

$$\mu_2 (i_{onn}^*)^2 + \mu_1 i_{onn}^* + \mu_0 = 0, \quad (12)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \mu_2 &= 4c^2 d^4 [1 + 2cd - d^2 c(2b - c)]; \\ \mu_1 &= d^2 c_4 \{1 + cd(3 + 2bd) + c^2 d^2 [1 + d(2b - c)]\}; \\ \mu_0 &= cd [2 + cd(5 - c^2 d^2) + 2bcd^2 (2 + cd)]. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решая (12) относительно i_{onn}^* , получаем оптимальное значение тока нагрузки солнечного элемента, при котором мощность достигнет максимального значения

$$i_{opt}^* = \frac{1}{2\mu_2} [-\mu_1 \pm (\mu_1^2 - 4\mu_0\mu_2)^{1/2}]. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (10), для оптимального значения напряжения $U_{dc,onn}^*$

$$\begin{aligned} U_{dc,onn}^* &= \frac{1}{cd^2} \left\{ -[1 + cd(1 + di_{onn}^*)] \pm \left[[1 + cd(1 + di_{dc,onn}^*)]^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + 2cd^2 [b - c - (a + cd)i_{onn}^* - \frac{1}{2} cd^2 (i_{onn}^*)^2] \right]^{1/2} \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

На основании экспериментальных данных в предлагаемом солнечном элементе заданными являются напряжение холостого хода $U_{dc,xx}$ и ток короткого замыкания i_{K3} . С учетом этих данных из (4), (6) определим эквивалентные коэффициенты $a, b, c, d, \mu_0, \mu_1, \mu_2$, необходимые для расчета оптимального тока i_{onn}^* и напряжения $U_{dc,onn}^*$.

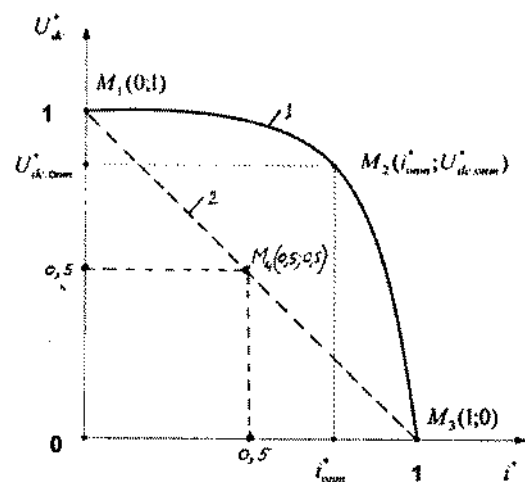


Рис. 4. Вольтамперная характеристика солнечного элемента: 1 – квадратная; 2 – линейная

Таким образом, получены координаты трех характерных точек $M_1(0;1)$, $M_2(i_{omn}^*; U_{dc,omn}^*)$, $M_3(1;0)$ (рис.4) вольтамперной характеристики. На основе координат трех характерных точек M_1, M_2, M_3 и формулы Лагранжа интерполяция вольтамперной характеристики $U_{dc}^* = f(i^*)$ дает аналитическое выражение:

$$U_{dc}^* = A_1 (i^*)^2 - (1 + A_1) i^* + 1, \quad (16)$$

где

$$A_1 = U_{dc,omn}^* / i_{omn}^* (i_{omn}^* - 1) + 1 / i_{omn}^*. \quad (17)$$

Если при разложении в ряд Тейлора второго члена правой части уравнения (5) учесть только первый двучлен и произвести аналогичным путем анализ, соответственно получим:

$$A_1 = 0; \quad U_{dc,omn}^* + i_{omn}^* = 1; \quad U_{dc}^* = 1 - i^*. \quad (18)$$

Уравнение (18) дает возможность построить линейную вольтамперную характеристику солнечного элемента (кривая 2 рис. 4).

Таким образом, в результате проведенной работы предложена полная структурная схема единой преобразовательной системы солнечного элемента - сети трехфазного переменного тока; установлены алгоритмы регулирования и управления процессов; получены квадратичное и линейное уравнения вольтамперной характеристики солнечного элемента и определены оптимальные значения напряжений и тока нагрузки.

Список использованной литературы

1. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В.М.Андреев, В.А.Григехес, В.Д.Румянцев – Л.: Наука, 1989. – 308 с.
2. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии / В.М.Андреев // Соросовский образовательный журнал. С.-Петербург: – 1996. – № 7. – С.93-98.
3. Кохреидзе Г.К. Совместная работа солнечной фотоэлектрической станции и сети трехфазного переменного тока / Г.К.Кохреидзе, Н.Г.Гогинашвили, Ш.А.Пхакадзе // Энергия. – Тбилиси: – 2011. – №3(59). – С.18-26.
4. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г.Раушенбах // Энергоатомиздат, – М.: – 1983. – 358 с.
5. Преобразовательная установка, работающая на сеть переменного тока / В.И.Сенько, У.В.Сенько, Л.И.Сенько, М.Хамрит. // Техн. электродинамика. – К.: – 2002. – Ч.1. – С. 62-65.
6. Фаренбрух А. Солнечные элементы. Теория и эксперимент /А.Фаренбрух, Р.Бьюб // Энергоатомиздат, – М.: 1987. – 279 с.
7. Якименко Ю.И. Фотоэнергетические системы / Ю.И.Якименко, А.Н.Шмырева, А.В.Богдан // Техн. электродинамика. – К.: – 2000. – Ч.1. – С. 85-92.

Получено 02.07.2011



Кохреидзе
Гиви Климентьевич,
канд. техн. наук,
ассоц. профессор
Грузинск. технич. ун-та,
Цинамдгвришвили 68,
Тбилиси, 0102, Грузия,
(+99599) 170014;
(+995 77)102742



Лаошвили
Деме Павлович,
д-р техн. наук, профессор
Грузинск. технич. ун-та,
Цинамдгвришвили 68,
Тбилиси, 0102, Грузия,
(+99599) 333399



Пхакадзе Шорена
Автандиловна,
докторант ГТУ,
0102,Цинамдгвришвили 68,
Тбилиси, Грузия,
(+99593) 718388