

УДК 621.311.243

Бекиров Э. А.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ – СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ – НА НАГРУЗКУ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗМУЩЕНИЙ И НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ

Розглядаються з'єднання фотоперетворювачів – сонячних батарей – у складанні для отримання необхідних енергетичних параметрів. За наявності обурень проведений теоретичний аналіз стійкості системи «фотобатарея з послідовно-паралельним з'єднання фотоперетворювачів – навантаження». Аналіз стійкості зводиться до аналізу властивостей коріння поліномів високого порядку, позитивні дійсні частини яких відповідають нестійким режимам. Для пониження порядку поліномів доцільно використовувати асимптотичні методи з сумісним аналізом характеру зміни структур систем рівнянь при їх розкладанні по малих параметрах.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, сонячна батарея, постійний струм, обурювання, нестійкість, характеристичне рівняння.

Рассматриваются соединения фотопреобразователей – солнечных батарей – в сборки для получения требуемых энергетических параметров. При наличии возмущений проведен теоретический анализ устойчивости системы «фотобатарея с последовательно-параллельным соединением фотопреобразователей – нагрузка». Анализ устойчивости сводится к анализу свойств корней полиномов высокого порядка, положительные действительные части которых соответствуют неустойчивым режимам. Для понижения порядка полиномов целесообразно использовать асимптотические методы с совместным анализом характера изменения структур систем уравнений при их разложении по малым параметрам.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, солнечная батарея, постоянный ток, возмещения, неустойчивость, характеристическое уравнение.

Considered compound solar cells-solar cells to build to obtain the required energy parameters. In the presence of perturbation theoretical analysis of system stability «fotobattery with a series-parallel connection of solar cells – the load». Analysis of stability reduces to analyzing the properties of the roots of polynomials of high order, positive real parts which correspond to unstable regimes. To lower the order of polynomials is advisable to use asymptotic methods to the joint analysis of the change in the structures of systems of equations with their expansion in small parameters.

Key words: photoelectric converter, solar battery, DC, recovery, instability, the characteristic equation.

Постановка проблемы. При работе фотоэлектрических преобразователей – солнечных батарей (СБ), являющихся составной частью солнечных электростанций (СЭС) – в режиме генерации электрической энергии в промышленную сеть составляющие СЭС солнечные батареи включают параллельно или последовательно в зависимости от того, какое значение тока или напряжения необходимо получить. СБ представляют собой генераторы постоянного тока. Вырабатываемая ими энергия постоянного тока подается на преобразователи постоянного тока в переменный (инверторы), которые на данном этапе можно характеризовать нагрузками солнечных батарей.

Анализ литературы. Исследования по вопросам электроэнергетических систем [1–3] проводятся до настоящего времени. Наиболее перспективным направлением решения данных вопросов является исследование работы фотопреобразователей – солнечных батарей.

Цель нашей статьи – проанализировать работу фотопреобразователей – солнечных батарей – при наличии возмущений и неустойчивостей.

Изложение основного материала. Солнечные батареи, имеющие по техническим данным одинаковые параметры, соединяются параллельно и последовательно.

При параллельной работе генераторов необходимо соблюдение следующих условий:

- при включении СБ на параллельную работу с другими не должно возникать значительных толчков тока, способных вызвать нарушения в работе потребителей;
- СБ должны нагружаться, по возможности, равномерно, пропорционально их номинальной мощности.

При нарушении постоянного условия полное использование мощности всех СБ невозможно: когда одна СБ нагружается полностью, другие недогружены, а дальнейшее увеличение общей нагрузки невозможно, так как отдельные СБ будут перегружаться. Кроме того, при равномерной нагрузке СБ суммарные потери всех СБ могут быть больше, а общий к.п.д. – меньше, чем при равномерной нагрузке.

На рис. 1 представлена эквивалентная схема замещения фотоэлемента, на рис. 2 – вольтамперная характеристика солнечного фотоэлемента (СЭ).

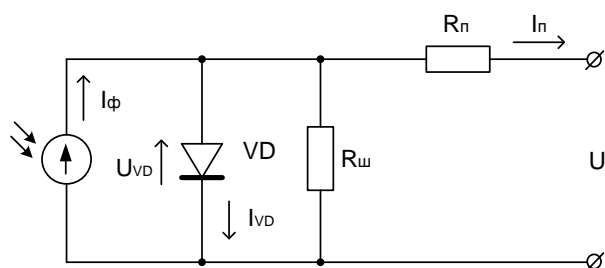


Рис. 1. Эквивалентная схема СЭ.

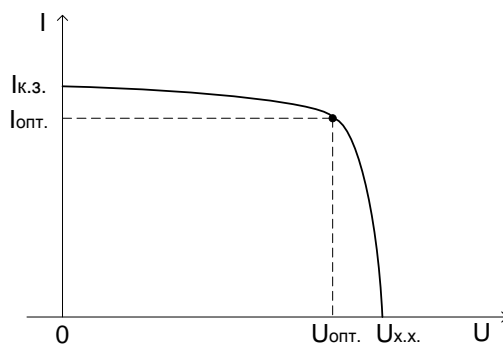


Рис. 2. Вольтамперная характеристика солнечного фотоэлемента.

Запишем значения напряжений и токов СБ, состоящего из СЭ:

$$U_{СБ} = E - I_{\phi} \times R_{\Sigma}, \quad (1)$$

где $E = U_{х.х.}$

$$I_n = I_{\phi} - I_{о.н.} \left[e^{\frac{e(U + I_n R_{\Sigma})}{AkT}} - 1 \right] - \frac{U}{R_{\ш}}, \quad (2)$$

где $A = 1 \div 5$;

$I_{о.н.}$ – обратный ток насыщения;

I_{ϕ} – фототок;

R_{Σ} – последовательное сопротивление СЭ;

$R_{\ш}$ – шунтовое сопротивление СЭ;

$U + I_n R_{\Sigma}$ – диодное напряжение, падающее на самом СЭ.

При работе СЭ на внешнюю нагрузку:

$$U + I_n R_{\Sigma} > U_{\text{вых.}} \text{ и } U_n = I_n R_{\text{внешн. нагр.}}$$

Для обеспечения требуемого напряжения на нагрузки СБ, которые образуют сборку, включаются последовательно (рис. 3).

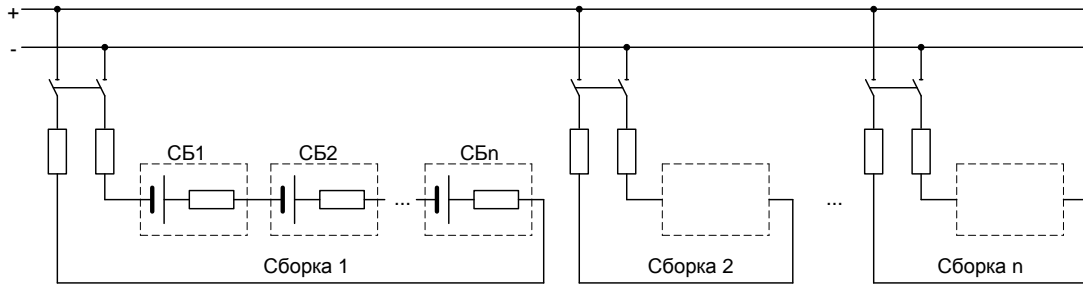


Рис. 3. Схема параллельного включения сборок солнечных батарей на нагрузку в СЭС.

При построении солнечной электростанции (СЭС) включено n сборок. Для получения необходимой мощности эти сборки соединяются последовательно, чтобы получить мощность сборки $P_{\text{сборки}}$:

$$P_{\text{сборки}} = U_{\text{СБ сборки}} \times I_{\text{СБ сборки}}.$$

Напряжение на выходе сборки:

$$U_{\text{СБ}} = U_{\text{СБ1}} + U_{\text{СБ2}} + \dots + U_{\text{СБn}} = (E_1 + E_2 + \dots + E_n) - (I_{\text{H1}} \cdot R_{\text{э1}} + I_{\text{H2}} \cdot R_{\text{э2}} + \dots + I_{\text{Hn}} \cdot R_{\text{эn}}). \quad (3)$$

Таким образом, для всей системы, являющейся нагрузкой сборки СБ, питающей инвертор, напряжение постоянного тока определяется выражением:

$$U_{\text{СБ}} = \sum_{i=1}^k U_{\text{СБ}i} - \sum_{i=1}^k I_i \cdot R_{\text{э}i}. \quad (4)$$

В данном выражении величина $U_{\text{СБ}}$, даже при небольшом отличии величин $U_{\text{СБ1}}, U_{\text{СБ2}}, \dots, U_{\text{СБn}}$ суммарное значение для однотипных СБ не изменяется в широких пределах. Вторая составляющая $\sum_{i=1}^k I_i \cdot R_{\text{э}i}$ может иметь некоторые отличия технических параметров: сопротивлений, емкостей, индуктивностей и вентилля, входящих в СЭ. Эта величина может иметь составляющую, изменяющуюся с некоторой частотой, причем частота для каждого СЭ может быть также переменной:

$$U_{\text{вв.СЭС}} = U + j\omega U. \quad (5)$$

Наличие переменных составляющих может приводить к возникновению модулированных колебаний в шинах, поступающих на вход инвертора:

$$R_3 = \frac{R_{\text{VD}} \cdot R_{\text{ш}}}{R_{\text{VD}} + R_{\text{ш}}} + R_n = \frac{R_{\text{VD}} \cdot R_{\text{ш}} + R_{\text{VD}} \cdot R_n + R_{\text{ш}} \cdot R_n}{R_{\text{VD}} + R_{\text{ш}}}. \quad (6)$$

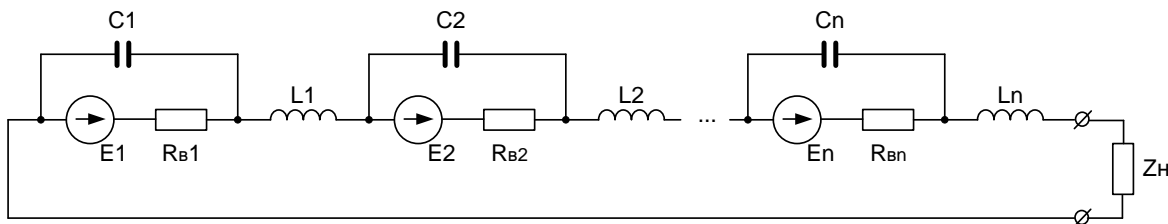


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения группы последовательно соединенных фотопреобразователей.

При работе СБ всегда возникают определенные возмущения режима работы (кратковременные колебания напряжения сети, кратковременные изменения выходных параметров СБ из-за изменения потока солнечной энергии и т. д.). Такие возмущения чаще всего бывают небольшими и кратковременными, однако при этом происходят небольшие и кратковременные нарушения установившегося режима.

Рассмотрим процессы развития неустойчивостей, возникающих в преобразователях, для анализа пробойных ситуаций и надежности системы электропитания в целом.

Малые возмущения и характеристическое уравнение для частоты возмущений в группе последовательно соединенных фотопреобразователей (рис. 4) получим при рассмотрении системы уравнений, составленных на основе законов Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_{\text{C1}} &= U_{\phi1}; U_{\text{C2}} = U_{\phi2}; \dots U_{\text{Cn}} = U_{\phi n}; \\ U_{\phi1} + U_{L1} &= U_{\text{H1}}; U_{\phi2} + U_{L2} = U_{\text{H2}}; \\ \dots U_{\phi n} + U_{L n} &= U_{\text{Hn}}; \\ U_{\text{H1}} + U_{\text{H2}} + \dots + U_{\text{Hn}} &= U_{\text{H}} \\ i_{\text{C1}} + i_{\phi1} &= i_{L1} = i_{\text{H}}; i_{\text{C2}} + i_{\phi2} = i_{L2} = i_{\text{H}}; \\ \dots i_{\text{Cn}} + i_{\phi n} &= i_{L n} = i_{\text{H}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$U_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = L_1 \frac{di_{\text{H}}}{dt}; U_{L2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = L_2 \frac{di_{\text{H}}}{dt};$$

$$\dots; U_{L n} = L_n \frac{di_{L n}}{dt};$$

$$i_{\text{C1}} = C_1 \frac{dU_{\text{C1}}}{dt} = C_1 \frac{dU_{\text{H1}}}{dt}; i_{\text{C2}} = C_2 \frac{dU_{\text{C2}}}{dt} = C_2 \frac{dU_{\text{H2}}}{dt}; \dots$$

$$i_{\text{Cn}} = C_n \frac{dU_{\text{Cn}}}{dt} = C_n \frac{dU_{\text{Hn}}}{dt}$$

В соответствии с системой уравнений (7) возмущения $\delta U_{H1}; \delta U_{H2} \dots \delta U_{Hn}; \delta U_H; \delta i_H$ связаны соотношениями:

$$\delta U_{H1} = \frac{M_{12}}{M_{11}} \delta i_H; \delta U_{H2} = \frac{M_{22}}{M_{21}} \delta i_H; \delta U_{Hn} = \frac{M_{n2}}{M_{n1}} \delta i_H;$$

$$\delta U_{H1} + \delta U_{H2} + \dots + \delta U_{Hn} = \delta i_H, \quad (8)$$

где номиналы $M_{11}(\omega), M_{12}(\omega), \dots, M_{1n}(\omega), M_{21}(\omega), M_{22}(\omega), \dots, M_{2n}(\omega)$ могут быть определены с помощью следующих выражений, которые позволяют произвести анализ связи малых возмущений переменных δ , пропорциональных $\exp(\omega t)$, где t – время, а ω – частота возмущений.

С учетом вышеизложенного приходим к следующей системе уравнений:

$$\delta U_H = \frac{M_{12}(\omega)}{M_{11}(\omega)} \delta i_{L1}; \delta U_H = \frac{M_{22}(\omega)}{M_{21}(\omega)} \delta i_{L2}; \dots; \delta U_H = \frac{M_{2n}(\omega)}{M_{1n}(\omega)} \delta i_{Ln}$$

$$\begin{aligned} M_{11}(\omega) &= 1 + q_1 c_1 \omega; M_{12}(\omega) = q_1 (1 + L_1 c_1 \omega^2); \\ M_{21}(\omega) &= 1 + q_2 c_2 \omega; M_{22}(\omega) = q_2 (1 + L_2 c_2 \omega^2); \\ M_{1n}(\omega) &= 1 + q_n c_n \omega; M_{2n}(\omega) = q_n (1 + L_n c_n \omega^2); \end{aligned} \quad (9)$$

$$q_1 = \frac{B_1}{(1 - C_1 U_{\Phi 0})^2}; q_2 = \frac{B_2}{(1 - C_2 U_{\Phi 20})^2};$$

$$\dots; q_n = \frac{B_n}{(1 - C_n U_{\Phi n0})^2};$$

$$q_1 < 0; q_2 < 0; \dots; q_n < 0,$$

где индексом «0» в $U_{\Phi 10}, U_{\Phi 20}, \dots, U_{\Phi n0}$ обозначены параметры некоторого начального или промежуточного состояния; в $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{1n}, M_{21}, M_{22}, \dots, M_{2n}$ первый индекс указывает на номер фотопреобразователя, а второй – на порядок полинома по ω .

После исключения из (9) промежуточных переменных $\delta_{L1}, \delta_{L2}, \dots, \delta_{Ln}$ приходим к следующей связи между возмущениями напряжения на нагрузке δU_H и тока нагрузки δi_H со стороны источника:

$$\delta U_H = \frac{P_4(\omega)}{S_3(\omega)} \delta i_H; P_4(\omega) = M_{12}(\omega) \cdot M_{22}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{2n}(\omega),$$

$$S_3(\omega) = M_{11}(\omega) \cdot M_{21}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{1n}(\omega) + M_{12}(\omega) \cdot M_{22}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{2n}(\omega), \quad (10)$$

где $P_4(\omega)$ – полином четвертого порядка по ω , равный произведению полиномов второго порядка по ω ;

$S_3(\omega)$ – полином третьего порядка по ω .

В случае одинаковых характеристик фотопреобразователей $M_{11} = M_{12} = \dots = M_{1n}; M_{21} = M_{22} = \dots = M_{2n}$ выражения формулы (10) упрощаются с понижением порядка полиномов $P_4(\omega), S_3(\omega)$ и принимают вид:

$$\delta U_H = \frac{P_2(\omega)}{2S_1(\omega)} \delta i_H; P_2(\omega) = M_{12}(\omega), S_1(\omega) = M_{11}(\omega), \quad (11)$$

где $P_2(\omega)$ – полином второго порядка по ω ;

$S_1(\omega)$ – полином первого порядка по ω .

Приведенные выражения (11) могут быть использованы непосредственно для анализа в

двух предельных случаях, соответствующих тем ситуациям, когда процессы в источнике питания не взаимосвязаны с процессами в нагрузке: а – режим короткого замыкания, б – режим холостого хода.

Когда выполняется условие $\delta U_H = 0$ (режим короткого замыкания), должны выполняться условия:

$$P_4(\omega) = 0 \Rightarrow M_{12}(\omega) \cdot M_{22}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{2n}(\omega) = 0 \quad (12)$$

для фотопреобразователей с различными характеристиками и

$$P_2(\omega) = 0 \Rightarrow M_{12}(\omega) = 0 \quad (13)$$

для фотопреобразователей с одинаковыми характеристиками.

В случае холостого хода, когда выполняется условие $\delta i_H = 0$, характеристические уравнения для частоты возмущений ω принимают вид:

$$S_3(\omega) = 0 \Rightarrow M_{11}(\omega) \cdot M_{22}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{nn}(\omega) + M_{12}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{21}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{n1}(\omega) = 0 \quad (14)$$

для случая фотопреобразователей с различными характеристиками и

$$S_2(\omega) = 0 \Rightarrow M_{11}(\omega) = 0 \quad (15)$$

для случая фотопреобразователей с одинаковыми характеристиками.

В общем случае для получения характеристического уравнения для ω , необходимого для анализа устойчивости системы, необходимо уравнение (10) замкнуть связью между возмущениями напряжения на нагрузке δU_H и током нагрузки δi_H , которую для большого диапазона нагрузок можно представить в виде отношения двух полиномов T_m, Q_n соответственно порядка m, n

$$\delta U_H = \frac{T_m}{Q_n} \delta i_H, \quad (16)$$

исключая из (10), (16) δU_H или δi_H , приходим к характеристическому уравнению вида:

$$P_4(\omega) \cdot Q_n(\omega) - S_3(\omega) \cdot T_m(\omega) = 0, \quad (17)$$

порядок которого, а следовательно, и число независимых корней определяются максимальными значениями $m + 3, n + 4$.

Из выражения (10) окончательно приходим к следующей связи между возмущениями напряжения нагрузки δU_H и тока нагрузки δi_H со стороны источника питания:

$$\begin{aligned} \delta U_H &= \frac{S_3(\omega)}{P_2(\omega)} \delta i_H; P_2(\omega) = \\ &= M_{11}(\omega) \cdot M_{21}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{n1}(\omega), \end{aligned} \quad (18)$$

Для идентичных фотопреобразователей (18) преобразуется к виду:

$$\delta U_H = \frac{2M_{12}(\omega)}{M_{11}(\omega)} \delta i_H, \quad (19)$$

что коррелирует с выражением (11) с точностью до коэффициента.

В общем случае при соединении последовательной группы фотопреобразователей с нагрузкой, для которой выполняется соотношение (18), характеристическое уравнение для частоты возмущений ω имеет структуру:

$$S_1(\omega) \times Q_n(\omega) - P_2(\omega) \times T_m(\omega) = 0, \quad (20)$$

порядок которой по ω , по крайней мере, на единицу меньше порядка уравнения (17).

Для частных предельных случаев (режимов короткого замыкания – (а) и холостого хода – (б)) выражение (18) трансформируется к виду:

$$S_3(\omega) = 0 \Rightarrow M_{11}(\omega) \cdot M_{22}(\omega) \cdot \dots \cdot M_{mm}(\omega) + M_{12}(\omega) \cdot M_{21}(\omega) = 0$$

$$P_2(\omega) = 0 \Rightarrow M_{12}(\omega) = 0, \quad (21)$$

причем характеристическое уравнение для режима холостого хода имеет одинаковую структуру как при параллельном, так и при последовательном (21) соединении фотопреобразователей.

Выводы.

Анализ устойчивости сводится к анализу свойств корней полиномов высокого порядка вида (17), (18), положительные действительные части которых соответствуют неустойчивым режимам, и может быть выполнен известными методами.

Для понижения порядка полиномов (17), (18) целесообразно использовать асимптотические методы с совместным анализом характера изменения структур исходных систем уравнений (7) при их разложении по малым параметрам, обусловленным малостью емкостных и индуктивных сопротивлений фотопреобразователей по сравнению с их внутренними сопротивлениями.

Аналогичная рассмотренной выше схема анализа возмущений и их устойчивости может быть использована для комбинированных источников электропитания типа «фотопреобразователь – электрический аккумулятор», «фотопреобразователь – топливный элемент».

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории цепей / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов]. – М. : Энергия, 1975. – 752 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1973. – 752 с.
3. Электроэнергетические системы / [под ред. В. А. Веникова]. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.