

УДК 621.311.243:502.174.3

Э. А. Бекиров

Национальная академия природоохранного и курортного строительства, г. Симферополь, Украина
e-mail: napks_eif@mail.ru

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Ключевые слова: солнечные электростанции, электроснабжение, модуляция.

Введение

Использование возобновляемой энергетики для повышения энергетического потенциала Крыма и южных областей Украины является актуальным направлением энергетики и предопределено климатическими условиями. Строительство и ввод в эксплуатацию солнечных электростанций (СЭС) и ветроэлектростанций (ВЭС) в Крыму позволяет в значительной мере уменьшить энергодефицит на Крымском полуострове. В настоящее время в Крыму введены в эксплуатацию семь ВЭС и четыре СЭС, генерирующих электрическую энергию в общую энергосистему, с суммарной мощностью 67,7 МВт и 327,5 МВт, составляющей до 31,5 % от общих генерирующих станций, работающих в Крыму. Для активного использования солнечной энергии существуют различные технологии. Основным показателем для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую энергию, при использовании солнечных батарей (СБ), является уровень инсоляции, который зависит от времени года, расположения и площади поглощающей поверхности.

Энергия постоянного тока, выработанная солнечными батареями, может использоваться как напрямую различными нагрузками постоянного тока, запасаться в аккумуляторных батареях для последующего использования или покрытия пиковой нагрузки, а также преобразовываться в трехфазный переменный ток для питания различной нагрузки переменного тока или генерироваться в общую энергосистему, осуществляемой солнечными электростанциями.

СЭС в Крыму генерируют электрическую энергию в течение всего года: в зимнее время генерация электроэнергии в энергосистему продолжается в течение 8 часов, а в летнее время – в течение 14-15 часов. Генерация электроэнергии СЭС происходит в течение дневного времени, а потребление электрической энергии нагрузками осуществляется практически в течение суток, то есть и в ночное время. В ночное время потребители используют электроэнергию из энергосистемы, в которую генерируют другие источники энергии – ВЭС, ТЭС, ГЭС и другие.

Цель и постановка задачи

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) – солнечные батареи применяются в СЭС прямого действия. Солнечная электростанция включает собственно сами солнечные батареи, включенные параллельно или последовательно, для получения требуемого значения тока или напряжения, соединительные линии и преобразовательные устройства, трансформаторы, системы автоматики, защиты и сигнализации, для генерации электрической энергии в общую электроэнергетическую систему (рис. 1).

Электрическая энергия постоянного тока с солнечных батарей поступает на преобразователи постоянного тока в переменный трехфазный ток – инверторы.

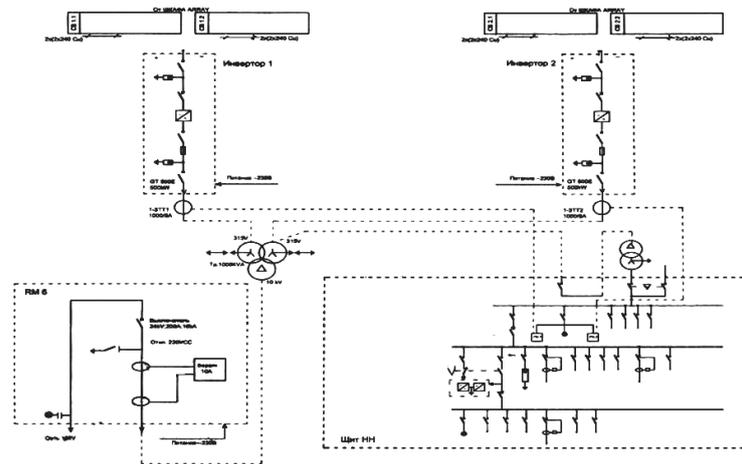


Рис. 1. Структурная схема электропитания СЭС

Выходное трехфазное напряжение инверторов подается на трехфазный трансформатор, включенный по схеме Δ . Генерируемое трехфазное напряжение поступает в общую энергосистему.

Объектом исследований являются напряжение и токи, генерируемые СЭС в энергосистему. Это приводит к задаче анализа качества электрической энергии, поступающей в энергосистему, определению и анализу энергетических параметров, оценку факторов, влияющих на качество электроэнергии и различных возмущений.

Методика исследований

Методика исследований заключается в регистрации и осциллографировании трехфазных напряжений и токов на выходе трехфазного трансформатора на стороне 10 кВ, напряжений и токов на линии ВЛ 110 кВ. Для анализа напряжений и токов, и определения качества электрической энергии воспользуемся гармоническим анализом разложения в ряд Фурье с целью определения гармонических составляющих в кривых напряжения и тока. Для расчета установившихся режимов сложных электрических систем необходимо составление линейных уравнений установившегося режима электрической системы. Целью расчета установившихся режимов является определение параметров симметричных установившихся режимов электрических сетей прямыми методами.

В качестве первичных элементов для преобразования солнечного излучения (СИ) в энергию постоянного тока в СЭС используются фотоэлементы, которые выпускаются с различными вольт – амперными характеристиками (ВАХ). По форме ВАХ близкой к режиму источника тока, зависимость напряжения фотопреобразователя $U_{\Phi n}(\bar{\varphi}_1)$ от величин интенсивности излучения $\bar{\varphi}_1$ минимальна, что наиболее удобно для применения таких ФЭ в схеме инверторов тока (И). Для указанного типа И соотношение между входным напряжением постоянного тока $U_{\Phi n}(\bar{\varphi}_1)$ от фотопанели, объединяющей группу ФЭ, включенных последовательно и параллельно - и выходным напряжением И – $U_{\Phi 1}$ равно

$$U_{\Phi n}(\bar{\varphi}_1) = 2,34 U_{\Phi 1} \cdot n \cdot \cos \beta + \Delta U_{\gamma}(I) + \Delta U_{IGBT}, \quad (1)$$

где n – количество фотоэлементов в фотопанели;

β – угол включения $IGBT$ – модулей, γ – угол коммутации $IGBT$ – модулей;

$\Delta U_{\gamma}(I)$ – падение напряжения за счет процесса коммутации тока I инвертора;

ΔU_{IGBT} – падение напряжения на $IGBT$ – модулях.

В случае коммутации тока ФЭ значения угла γ сравнительно невелики из-за малой индуктивности цепи коммутации, минимальные значения угла β не превышают 15° , поэтому для расчетов $U_{\Phi 1}$ можно принять $\Delta U_{\gamma}(I)$ и ΔU_{IGBT} равными нулю [1] и определить $U_{\Phi 1}$ по формуле [2]

$$U_{\Phi 1} = \frac{U_{\Phi n}(\bar{\varphi}_1)}{2,34 \cdot \cos \beta} \quad (2)$$

Для передачи в сеть $U_{\Phi 1}$ со стандартным допуском ($\pm \Delta U_{\Phi} = 5\%$) при значительном изменении $U_{\Phi n}(\bar{\varphi}_1)$ режим работы И необходимо регулировать изменением угла β [4]. Регулирование β усложняет схему управления И и ведет, при увеличении β , к росту числа высших гармоник в составе $U_{\Phi 1}$.

Если зависимость $U_{\phi n}(\bar{\varphi}_1)$ от величины $\bar{\varphi}_1$ минимальна, при работе ФП, по ВАХ близкой к режиму источника тока, соотношение (2) можно представить в виде

$$U_{\phi 1} = \frac{U_{\phi n}(\bar{\varphi}_1)}{2,34 \cdot (0,9 \dots 0,95)} \quad (3)$$

где $\frac{U_{d0}}{U_2} = 2,34$ - среднее значение входного напряжения постоянного тока на входе инвертора по отношению к действующему значению фазного напряжения обмотки трансформатора на выходе.

Экспериментальные исследования

На рис. 2 представлена упрощенная схема внутренней сети СЭС.

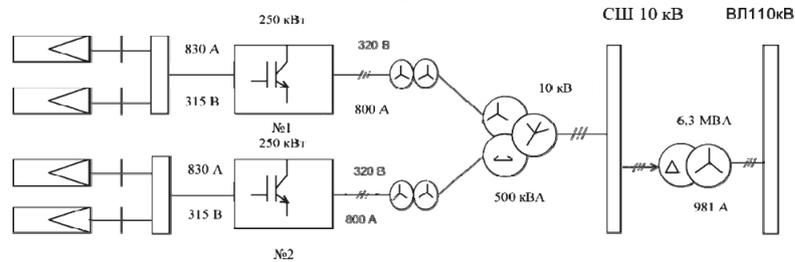


Рис. 2. Схема внутренней сети СЭС

Осциллограммы напряжений и токов на линии ВЛ – 110 кВ показаны на рисунках 3 и 4.

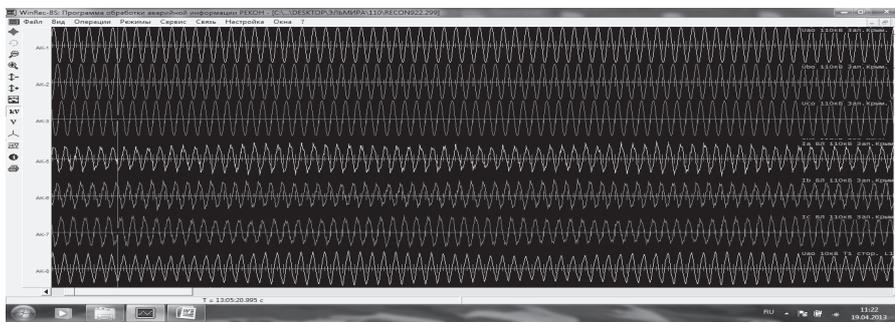


Рис. 3

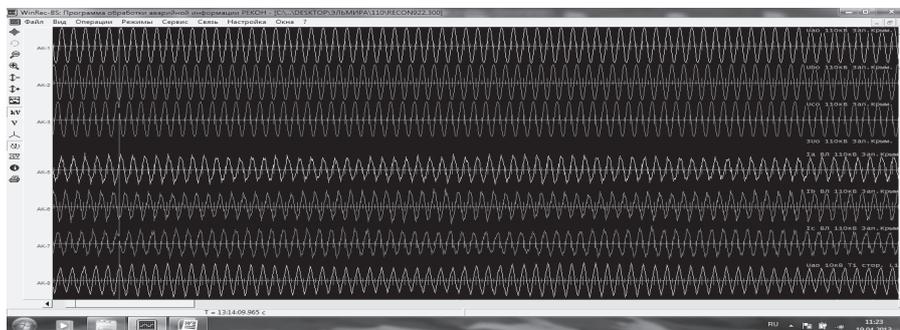


Рис. 4.

Осциллограммы напряжений и токов на линии 10 кВ показаны на рис. 5.



Рис. 5

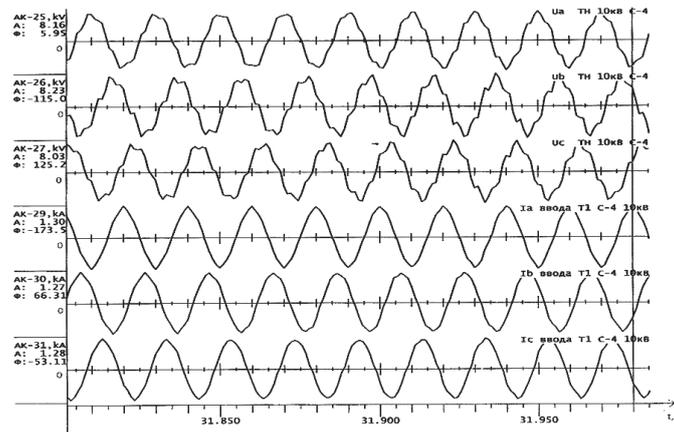


Рис. 6. Осциллограммы напряжений и токов

Источниками, возбуждающими гармоники в токе, генерируемой электроэнергией в сети электропитания, являются генераторы тока гармоник – инверторы №1 и №2. Токи в цепях питания содержат как гармоники сетевой частоты 50 Гц, так и высокочастотные помехи, возбуждаемые в цепи питания. Эти помехи создаются переключениями МОП - транзисторов (*JGBT* - транзисторов). Линия от выхода инверторов до ВЛ энергосистемы, включает трансформаторы и другие элементы, представляет собой активное и реактивное сопротивление линии электропередачи (Z_h) для гармоники h – порядка. Гармонический ток h – порядка создает через сопротивление Z_h гармоническое напряжение $U_h = Z_h \cdot I_h$. Искажение для гармонического тока тем больше, чем больше сопротивление сети. Суммарный ток гармоник $\sum I_h$ и искаженное напряжение создают гармонические возмущения, идущие в сеть и к другим потребителям.

Возмущения, вызываемые гармониками, проходящими по сети, ухудшают качество энергии и являются причиной отрицательных эффектов:

- перегрузка распределительных сетей из-за увеличения действующей величины тока;
- перегрузка нулевых рабочих проводников из-за суммирования гармоник 3-го порядка;
- перегрузка, вибрация и старение электрического оборудования и аппаратов;
- искажение напряжения питания, что может создать помехи для чувствительных потребителей;
- возмущение в сетях.

Перегрузки сети вынуждают увеличивать заявленную мощность и приводят к дополнительным потерям или к необходимости завышения параметров установки. Искажения тока вызывают ложные отключения и остановку производственного оборудования.

В трехфазных цепях чаще всего встречаются нечетные гармоники, которые на практике доставляют больше всего неприятностей. Поставщики электрической энергии контролируют гармоники 3,5,7,11,13 порядков. Коэффициент амплитуды (крест фактор) для несинусоидального сигнала он может быть больше $\sqrt{2} K_I = \frac{I_m}{I}$; $K_U = \frac{U_m}{U}$.

Коэффициент амплитуды, потребляемых нелинейными нагрузками токов может иметь значения 1,5; 2 и до 5 в критических случаях. Очень большой коэффициент амплитуды свидетельствует о наличии значительных сверхтоков. Общее гармоническое искажение от 10 до 50 % свидетельствует о значительном гармоническом возмущении.

Проведем анализ осциллограмм напряжений и токов, представленных на рисунках 3,4,5. Из осциллограмм видно, что напряжения и токи содержат высшие гармонические составляющие, а в кривых токов фаз А, В, С присутствует и амплитудная модуляция. Модулирующая частота Ω составляет для тока фазы А – $f = 1,695$ Гц; тока фазы В – $f = 1,73$ Гц; тока фазы С – $f = 1,64$ Гц. Величина расчетного тока $I = 578$ А для СЭС мощностью 80 МВт. Частота составляет от 48,36 Гц до 48,27 Гц. Определим коэффициенты модуляции для токов фаз А, В, С.

$$m_{IA} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = 0,225; \tag{4}$$

$$m_{IB} = 0,152; m_{IC} = 0,163.$$

При параллельной работе инверторов необходимо согласование на частоте и амплитуде задающих генераторов, управляющих работой инверторов; в данном случае согласование задающих напряжений сети, управляющих работой инверторов, так как инверторы ведомые сетью.

Функция, описывающая амплитудную модуляцию

$$f(t) = I_m (1 + m \sin \Omega t) \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где ω – несущая частота; Ω – модулирующая частота, $\Omega \ll \omega$;
 m – коэффициент модуляции (глубина модуляции), $m < 1$.

Наличие амплитудной модуляции в осциллограммах токов фаз А, В, С может привести к несимметрии токов. Коэффициент несимметрии токов может быть измерен степенью неуравновешенности мощности. В общем случае мгновенное значение мощности трехфазной системы $p = U_A i_A + U_B i_B + U_C i_C$. Когда система напряжений симметрична, а токи несимметричны и система нулевой последовательности отсутствует, можно написать

$$\begin{aligned} U_A &= U_m \sin \omega t; \quad U_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ); \quad U_C = U_m \sin(\omega t - 240^\circ); \\ i_A &= I_{1m} \sin(\omega t - \varphi) + I_{2m} \sin(\omega t - \psi - \varphi); \\ i_B &= I_{1m} \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) + I_{2m} \sin(\omega t - 240^\circ - \psi - \varphi); \\ i_C &= I_{1m} \sin(\omega t - 240^\circ - \varphi) + I_{2m} \sin(\omega t - 120^\circ - \psi - \varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

где I_{1m}, I_{2m} – амплитудные значения токов прямой и обратной последовательностей;
 ψ – угол между основными векторами токов прямой и обратной последовательностей;
 φ – угол сдвига фаз тока прямой последовательности относительно напряжения.

Определив мощности отдельных фаз, запишем общее выражение мощности

$$p = 3 U I_1 \cos \varphi - 3 U I_2 \cos(2\omega t - \psi - \varphi) \quad (7)$$

При симметричной системе напряжений и несимметричной системе токов средняя за период (активная) мощность определяется токами прямой последовательности, а колеблющаяся – токами обратной последовательности.

Амплитуда колеблющейся части

$$P_m'' = 3 U I_2 \quad (8)$$

Полная мощность

$$S = 3 U I_1 \quad (9)$$

Степень неуравновешенности

$$\alpha_p = P_m'' / S = 3 U I_2 / 3 U I_1 = \frac{I_2}{I_1} \quad (10)$$

При трехфазной симметричной системе напряжений и несимметричной системе токов степень неуравновешенности мощности равняется коэффициенту несимметрии токов. Никакие схемы трансформаторов не могут неравномерную нагрузку трехфазной системы обратить в равномерную.

Наличие колебаний является специфическим свойством нелинейных систем. Далеко не во всяких нелинейных системах они могут иметь место, но возникать они могут только в нелинейных системах. Если в какой-либо реальной системе на практике наблюдаются амплитудно-модулированные колебания, то это всегда обязательно является следствием наличия определенного вида нелинейности в этой системе. Амплитуда и частота колебаний существенно зависят от параметров нелинейной системы.

В симметричных цепях симметричные составляющие одной последовательности не влияют на симметричные составляющие другой последовательности. Токи прямой последовательности вызывают падение напряжения только прямой последовательности, а токи обратной или нулевой последовательности – только падения напряжения соответственно обратной или нулевой последовательностей. Поскольку симметричные составляющие токов вызывают падения напряжения той же последовательности, то можно говорить о соответствующем сопротивлении цепи той или иной последовательности. При пользовании методом симметричных составляющих, различают три вида полных сопротивлений: по отношению к токам прямой, обратной и нулевой последовательностей. В симметричных цепях полные сопротивления прямой и обратной последовательностей статических элементов (трансформаторы, линии электропередач, реакторы, конденсаторы) одинаковы; сопротивление же нулевой последовательности может от них отличаться.

У вращающихся машин, как правило, полные сопротивления различных последовательностей различны.

Большое значение имеет относительный коэффициент несимметрии тока, представляющий собой отношение модуля тока обратной последовательности к номинальному току, для которой оценивается влияние токов обратной последовательности [4]

$$\alpha = I_2 / I_{\text{НОМ}}; \quad \alpha_1 = \frac{I_2}{I_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Коэффициент несимметрии тока составляет $\alpha_{IA}=0,011$; $\alpha_{IB}=0,011$; $\alpha_{IC}=0,03$ [4].

Коэффициент несимметрии напряжения представляет собой отношение напряжения обратной последовательности к напряжению прямой последовательности $\alpha'_U = U_2/U_1$.

Коэффициенты нелинейных искажений по напряжениям фаз U_A, U_B, U_C составляют; $K_{н.и.А}=2,3\%$; $K_{н.и.В}=1,9\%$; $K_{н.и.С}=2,22\%$;

Так как напряжение прямой последовательности отличается от номинального напряжения $U_{НОМ}$ на потерю напряжения прямой последовательности, обычно последняя незначительна, то принимают вместо α_U относительный коэффициент несимметрии, равный отношению модуля напряжения обратной последовательности к номинальному напряжению:

$$\alpha_U = U_2/U_{НОМ}; \alpha_U = U_2/U_{НОМ} \cdot 100\% \quad (12)$$

Потеря мощности от токов прямой последовательности на участке длины линии передачи $(I_n - I_{n-1})$ во всех трех проводах линии

$$\Delta P_n = 3r(I_n - I_{n-1})(\sum_{j=1}^n I_{j1})^2 = \frac{1}{3}r(I_n - I_{n-1})(\sum_{j=1}^n I_j)^2 \quad (13)$$

где I_{h1} и I_h – токи прямой последовательности и полный ток любой фазы за пределами подстанции h (они суммируются арифметически).

Нагрузки же токов обратной последовательности различных фаз будут сдвинуты друг относительно друга на 120° .

Кривые переменного тока различных потребителей и напряжения на их зажимах в ряде случаев отличаются от синусоиды вследствие искажения, вызванного характером нагрузки отдельных потребителей.

Высшие гармоники в кривых тока и напряжения получаются значительными, если от системы питаются потребители, имеющие мощные статические преобразователи [5]. Такие потребители являются мощными генераторами высших гармоник. Появление гармоник в кривой тока, ее искажение, всегда связано с нелинейными элементами электрической системы. К числу нелинейных элементов относятся цепи со сталью, и особенно цепи, содержащие выпрямительные установки.

В случае генерации электроэнергии в энергосистемы весьма большой (практически бесконечной) мощности, напряжение этой системы остается синусоидальным, хотя токи будут несинусоидальными. В этом случае напряжение всех гармоник U_k , кроме первой (основной), обращается в нуль, следовательно, и в уравнении активной мощности при несинусоидальном напряжении и токе

$$P = \sum_{k=1}^{\infty} P_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k, \quad (14)$$

где k – номер гармоники;

φ_k – угол сдвига фаз k – гармоники.

В уравнении произведения $U_k I_k$ для всех гармоник, кроме первой, также обращаются в ноль и выражение (14) заменяется известным выражением для синусоидальных напряжений и токов

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Активная мощность передается только первой гармоникой. Коэффициент мощности запишем как отношение активной мощности P к полной мощности при несинусоидальных токах

$$\lambda = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{U_1 \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 \quad (15)$$

где $\frac{I_1}{I} = \nu$ – коэффициент искажения кривой тока, λ всегда меньше $\cos \varphi_1$.

Как видно из рис. 3, 4, 5 кривая тока не будет подобна кривой напряжения, т.е. процентное содержание гармоник тока не повторяет процентного содержания гармоник напряжения.

Рассмотрим одну из особенностей работы цепи при несинусоидальном напряжении. Если цепь обладает незначительным активным сопротивлением и сравнительно большим индуктивным, то напряжения первой и k -той гармоник могут быть записаны в виде

$$U_1 = x_L I_1 = \omega L I_1; U_k = x_{Lk} I_k = k\omega L I_k, \text{ коэффициент искажения кривой}$$

$$\frac{I_k}{I_1} = \frac{U_k}{kU_1}, \text{ или, представляя через максимальные значения тока и напряжения:}$$

$$I_{km}/I_{1m} = U_{km}/kU_{1m} \quad (16)$$

В цепях, обладающих в основном индуктивным сопротивлением, отношение амплитуд гармоник тока (k –той и 1-ой) в k раз меньше отношения амплитуд напряжения тех же гармоник. Следовательно, индуктивности в цепи, к зажимам которой приложено несинусоидальное напряжение, приведут к сглаживанию кривой тока, т.е. к приближению ее к синусоиде.

Обратную картину можно наблюдать при преобладании емкостного сопротивления. Если в цепи есть только емкостное сопротивление, то имеем

$$\begin{aligned} I_{1m} &= \omega C U_{1m}; I_{km} = k\omega C U_{km} \\ I_{km}/I_{1m} &= kU_{km}/U_{1m} \end{aligned} \quad (17)$$

т. е. отношение амплитуд гармоник тока (k –той и 1-ой) в k раз больше отношения амплитуд напряжения тех же гармоник. Следовательно, кривая тока искажается сильнее, чем кривая напряжения. С увеличением активного сопротивления цепи указанные явления проявляются менее ярко, т.е. кривая тока при индуктивном сопротивлении меньше приближается, а при емкостном – меньше отдалается от синусоиды.

Практически, при генерировании электрической энергии вырабатываемой СЭС прямого действия, в общей сети приходится иметь дело с элементами как индуктивного, так и емкостного сопротивлений. Полное сопротивление

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)^2} \quad (18)$$

При некотором значении $k = q$ может наступить явление резонанса напряжений, то есть

$$q\omega L = \frac{1}{k\omega C} \quad (19)$$

Тогда имеем, $Z_q = R_q$ и соответствующая гармоника тока проявляется наиболее заметно.

С изменением порядка гармоники изменяется реактивное сопротивление и соответственно проявляется процентное содержание гармоник тока в кривой тока. Если для первой гармоники сопротивление равно x_1 , то с увеличением k оно падает, обращаясь в ноль при $k = q$ (резонанс напряжений). С увеличением порядка гармоники k от 1 до q процентное содержание гармоник в кривой тока проявляется сильнее, чем в кривой напряжения. В диапазоне k от q до q^2 оно вновь снижается и при q^2 содержание гармоник в кривых напряжения и тока становится одинаковым. При дальнейшем увеличении k в кривой тока происходит сглаживание гармоник.

На рис. 3 представлены осциллограммы напряжений и токов трех фаз на стороне 110 кВ. Эпюры напряжений на обмотках трансформатора со стороны 110 кВ показывают, что это выходы трех фаз квазисинусоидального преобразователя, который имеет четыре уровня квантования, что видно по количеству ступеней и означает, что присутствуют высшие гармонические составляющие, вызванные работой преобразователя вплоть до 700 Гц (14 ступеней). Анализ токов фаз А, В, С на стороне 110 кВ показывает, что огибающая пофазно сдвинута на 120°. На рис. 4 представлены осциллограммы напряжений и токов линии 110 кВ (ВЛ 110 кВ). Осциллограммы напряжений и токов (рис. 3, 4) показывают, наличие высших гармоник. В осциллограммах токов I_A, I_B, I_C , кроме основной частоты присутствует огибающая частот во всех трех фазах, что свидетельствует о наличии амплитудной модуляции. Огибающая фазного напряжения U_A на стороне 10 кВ (рис. 5) соответствует огибающей на стороне 110 кВ (рис. 3, 4). Аналогичная картина наблюдается и по фазам В и С как на стороне 10 кВ (рис. 5), так и на стороне 110 кВ (рис. 3, 4).

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что частоты фаз А, В, С не совпадают и в трехфазном трансформаторе происходит их сложение, что приводит к появлению огибающей, которая пофазно сдвинута на 120°. Частота огибающей равна разности частот фаз соответственно:

$f_A - f_B; f_B - f_C; f_C - f_A$. Но в этой ситуации происходит и суммирование частот: $f_A + f_B; f_B + f_C; f_C + f_A$, что видно на осциллограммах напряжений (рис. 5).

Для устранения этого явления необходимо, чтобы частоты были одинаковые, т.е. $f_A = f_B = f_C$ абсолютно такие же, как получаются и в машинных генераторах ТЭС, ГЭС, АЭС. Это достигается пофазной синхронизацией по частоте и по фазе трехфазных инверторов, осуществляющих преобразование постоянного тока в переменный синусоидальный ток в СЭС.

Неблагоприятным фактором наличия амплитудной модуляции является то, что в случае, если мощности СЭС будут соизмеримы с мощностями традиционных источников, это может вызвать резонанс в ЛЭП на частотах от 1 до 3 Гц и 90-110 Гц ориентировочно в зависимости от разности частот и длины линий электропередач.

Кроме приведенных теоретическо-экспериментальных исследований, из осциллограмм видно, что на стороне 10 кВ присутствуют флуктуации напряжения, вызванные работой инвертора, а также небольшая разбалансировка напряжения в трехфазной сети – проявляется в различии амплитуд линейных напряжений относительно друг друга – возникает из-за различия нагрузок по разным фазам, приводящего к различию падения напряжения на импедансах фазных проводов.

Выводы

1. Определены модулирующие частоты для токов в фаз А, В, С. Рассчитаны коэффициенты не симметрии токов и напряжений.

2. Установлено, что в кривых токов фаз А, В, С присутствует амплитудная модуляция. Определены коэффициенты модуляции для токов фаз А, В, С, величина которых изменяется от 0,163 до 0,225.

3. По результатам исследований и анализа энергетических параметров необходимо, чтобы частота задающих напряжений была 50 Гц. Разница 1,5 – 2 Гц приводит к модулированным колебаниям. Если бы была цепь с последовательным включением R, L, C элементов можно было бы предполагать, что в цепи наступает резонанс напряжений. Линия короткая, при длинной линии необходим был бы учет емкостной составляющей между проводами. Для компенсации этих составляющих можно включать П-образный фильтр.

Список литературы

1. *Фаренбрух А., Бьюб Р.* Солнечные элементы: Теория и эксперимент/ Пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. – М.: «Энергоатомиздат», 1987. – 280 с ил.

2. *Бекиров Э. А.* Автономные источники электропитания на базе солнечных батарей. – Симферополь: ТИ «АРИАЛ», 2012г. – 480 с ил.

3. *Бекиров Э. А.* Расчет системы автономного электроснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей. Уч. Пособие: Бекиров Э. А., Воскресенская С. Н., Химич А. П. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2012. – 120 с.

4. *Бекиров Э. А., Романовский И. В.* Анализ качества электрической энергии, генерируемой солнечной электростанцией в энергосистему. Сб. научных трудов «Строительство и техногенная безопасность», № 40, 2011г., С. 106–115.

5. *Бекиров Э.А., Стрижаков К.П.* Оптимизация режимов распределения нагрузки в совмещенной системе с возобновляемыми источниками энергии. «Motrol», 2012, Люблин–Симферополь, № 1, стр. 149-153.

ANALYSIS OF ENERGY PARAMETERS OF ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS WEN USING RENEWABLE POWER SOURCES

E. A. Bekirov

Key words: vibration diagnostics, solar power stations electricity supply, modulation.