УДК 621.314: 621.382: 621.314.572

Г.В. Грабовецкий, Д.В. Коробков, С.А. Харитонов

Несимметричная нагрузка в системе генерирования электрической энергии с инвертором напряжения

Анализируется одна из особенностей работы инвертора напряжения в составе системы генерирования электрической энергии (СГЭЭ) переменного тока стабильной частоты, где нагрузка трехфазного тока является четырехпроводной. Определяется влияние несимметричной нагрузки на качественные показатели электрической энергии. Выявлены причины появления напряжения нулевой последовательности в выходном напряжении СГЭЭ, даны количественные оценки.

Ключевые слова: инвертор напряжения, нагрузка с нулевым проводом, несимметричная нагрузка.

В трехфазных системах электроснабжения автономных объектов нагрузка достаточно часто требует соединения в звезду с нулевым проводом, при этом допускается определенный уровень её несимметрии по фазам. Так, например, для систем электроснабжения самолетов и вертолетов в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54073-2010 небаланс нагрузок фаз может достигать величины 15% от номинальной мощности фазы.

В последние годы на летательных аппаратах находят применение системы генерирования электрической энергии типа «переменная скорость – постоянная частота», выполненные по схеме «синхронный генератор – полупроводниковый преобразователь частоты», представленной на рис. 1 [1, 2].

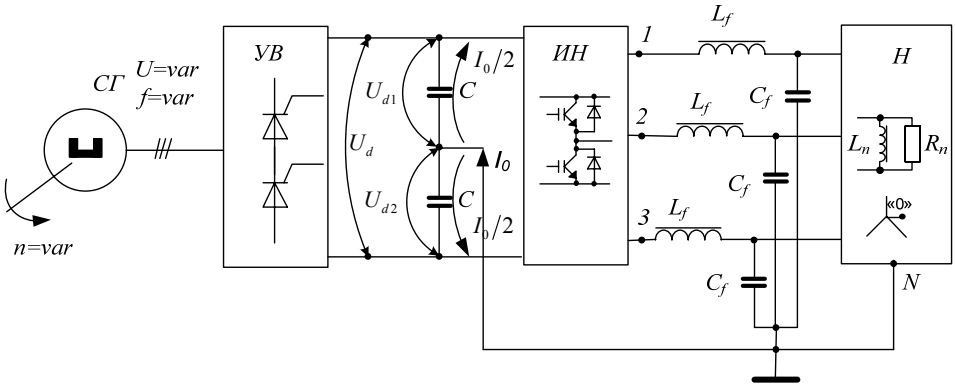

Рис. 1. Структурная схема системы генерирования

Здесь СГ – синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов; УВ – управляемый выпрямитель; ИН – инвертор напряжения с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией; Н (R_n, L_n) – нагрузка; C, C_f, L_f – элементы фильтров звеньев постоянного и переменного тока.

В этой схеме нулевой провод нагрузки «*N*» соединен со средней точкой конденсатора звена постоянного тока «*C*». Такое соединение позволяет уменьшить примерно в $\sqrt{2}$ действующее значение тока генератора, а также иметь шестикратные пульсации в напряжении U_d по отношению к частоте напряжения СГ [3].

Однако в такой схеме возникают проблемы с отработкой постоянной составляющей в выходном напряжении системы генерирования, а также в режимах несимметричной нагрузки.

В данной статье анализируются процессы в системе при несимметричной нагрузке.

Режим небаланса нагрузок по выходным фазам осложняется наличием конденсаторов *C* в звене постоянного тока инвертора напряжения, конечная величина их сопротивления на частоте основной гармоники выходного напряжения приводит в конечном счете к появлению нулевой последовательности в выходных напряжениях системы генерирования и, как следствие, недопустимым изменениям величины фазных напряжений и угла сдвига между ними.

Определим количественно взаимосвязь величины небаланса нагрузок с номинальным значением емкости конденсаторов C и величиной нулевой последовательности в выходных напряжениях СГЭЭ. Для решения поставленной задачи воспользуемся методом переключающих функций.

Анализ влияния несимметричной нагрузки на выходное напряжение инвертора напряжения

Для аналитического определения выходного напряжения инвертора воспользуемся известными переключающими функциями [3]: F_m^+, F_m^- – переключающие функции верхнего и нижнего транзисторов соответственно в стойке инвертора с номером «m». Здесь номер $m=1,2,3$ соответствует номеру выходной фазы инвертора. Переключающие функции связаны очевидным соотношением

$$F_m^- = 1 - F_m^+ .$$

Их можно определить следующим образом:

$$F_m^+ = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} M \sin\theta_m + \sum_{j=1}^{\infty} F_{msj} \sin(j \cdot a_k \vartheta) + F_{mcj} \cos(j \cdot a_k \vartheta) ,$$

где

$$F_{msj} = \frac{(-1)^j}{j2\pi}[(-1)^j - \cos(j\pi \cdot M \sin\theta_m)]; \qquad F_{mcj} = \frac{(-1)^j}{j2\pi} \sin(j\pi \cdot M \sin\theta_m);$$

$$\theta_m = \vartheta - (m-1)\frac{2\pi}{3}; \;\; \vartheta = \omega t; \;\; a_k = \frac{\omega_k}{\omega};$$

$M = Uy/U_{\text{оп}}$ – глубина модуляции; $Uy, U_{\text{оп}}$ – амплитудное значение управляющего и опорного напряжений; ω, ω_k – циклическая частота основной гармоники выходного напряжения и ШИМ.

При несимметричной нагрузке U_d будет содержать переменную составляющую с частотой Ω, вызванную током нулевого провода I_0. Для оценки влияния несимметрии нагрузки на входное напряжение инвертора и системы в целом воспользуемся схемой замещения, представленной на рис. 2.

Здесь зависимые источники U_1, U_2, U_3 отражают выходные напряжения ИН, определяются с помощью соотношения

$$U_m = U_{d1} F_m^+ - U_{d2}\left(1 - F_m^+\right), \quad m = 1,2,3. \tag{1}$$

Входные токи инвертора:

$$I_{d1} = \sum_{m=1}^{3} I_m F_m^+ , \; I_{d2} = \sum_{m=1}^{3} I_m F_m^- .$$

Ток в нулевом проводе:

$$I_0 = \sum_{m=1}^{3} I_m . \tag{2}$$

В дальнейших выводах рассмотрим лишь влияние несимметричной нагрузки на основные гармоники (Ω) токов и напряжений системы. В этом случае переключающую функцию можно ограничить лишь двумя членами ряда

$$F_m^+ \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{2} M \sin\theta_m . \tag{3}$$

Далее воспользуемся методом комплексных величин, при этом, как это принято, комплексные величины будем отмечать верхней точкой ($\dot{X}$).

Из рис. 2 следует:

$$\dot{U}_d = \dot{U}_{d1} + \dot{U}_{d2}, \quad \dot{U}_{d1} = \frac{U_d}{2} - \delta\dot{U}_d, \; \dot{U}_{d2} = \frac{U_d}{2} + \delta\dot{U}_d . \tag{4}$$

Величина $\delta\dot{U}_d$ обусловлена протеканием тока I_0 через конденсаторы C.

С учетом (1), (3) и (4) выходные напряжения инвертора определятся соотношением

$$\dot{U}_m = \frac{U_d}{2} M e^{j\theta_m} - \delta\dot{U}_d . \tag{5}$$

Напряжение $\delta\dot{U}_d$ определяет напряжение нулевой последовательности на выходе ИН:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}\sum_{m=1}^{3}\dot{U}_m = -\delta\dot{U}_d .$$

Для учета несимметричного характера нагрузки будем полагать, что нагрузка каждой из фаз представляет собой параллельное соединение элементов R_n и L_n, при этом эквивалентную нагрузку каждой фазы ИН представим в виде проводимости, причем:

$$\dot{G}_m = \dot{G} + \delta\dot{G}_m , \tag{6}$$

G – симметричная составляющая нагрузки (одинаковая во всех фазах ИН), $\delta\dot{G}_m$ – несимметричные составляющие нагрузки (различны в каждой фазе).

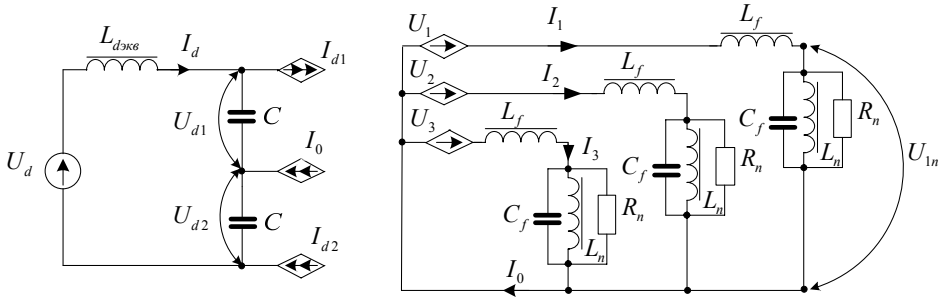

Рис. 2. Схема замещения системы генерирования

Тогда с учетом (2), (4) и (6) ток в нулевом проводе определится соотношением вида

$$\dot{I}_0 = \sum_{m=1}^{3}\dot{U}_m\dot{G}_m = \sum_{m=1}^{3}\left(\dot{U}_{cm} - \delta\dot{U}_d\right)\left(\dot{G} + \delta\dot{G}_m\right) = \sum_{m=1}^{3}\dot{U}_{cm}\delta\dot{G}_m - \delta\dot{U}_d\left(3\dot{G} + \sum_{m-1}^{3}\delta\dot{G}_m\right). \tag{7}$$

Из рис. 2 следует

$$\delta\dot{U}_d = \frac{Xc}{j\cdot 2}\dot{I}_0, \quad \dot{I}_0 = j\frac{2\delta\dot{U}_d}{Xc}, \tag{8}$$

где $j = \sqrt{-1}$, $XC = \dfrac{1}{\Omega C}$.

Подставляем (7) в (8), а полученное соотношение разрешаем относительно $\delta\dot{U}_d$, в результате получим

$$\delta\dot{U}_d = \frac{\sum_{m=1}^{3}\dot{U}_{cm}\delta\dot{G}_m}{j\dfrac{2}{Xc} + 3\dot{G} + \sum_{m-1}^{3}\delta\dot{G}_m}. \tag{9}$$

С учетом (8) будем иметь:

$$\dot{I}_0 = \frac{\sum_{m=1}^{3}\dot{U}_{cm}\delta\dot{G}_m}{1 - j\dfrac{Xc}{2}\left(3\dot{G} + \sum_{m-1}^{3}\delta\dot{G}_m\right)} = \frac{\dot{I}_{00}}{1 - j\dfrac{Xc}{2}\left(3\dot{G} + \sum_{m-1}^{3}\delta\dot{G}_m\right)},$$

где $\dot{I}_{00}$ – ток в нулевом проводе при $Xc \to 0$, определяется соотношением: $\dot{I}_{00} = \sum_{m=1}^{3}\dot{U}_{cm}\delta\dot{G}_m$.

Как следует из соотношений (5) и (9), из-за протекания тока I_0 через конденсаторы C появляется несимметрия в напряжениях инвертора, которая, очевидно, в напряжениях на нагрузке будет еще больше вследствие наличия падения напряжения на индуктивности L_f.

Для количественной оценки величины несимметрии определим величины $\dot{G}$ и $\delta\dot{G}_m$. Для принятой схемы замещения (см. рис. 2) получим следующие выражения:

$$\dot{G}(R_n,L_n)=\frac{-XL_n\cdot XC+jR_n\cdot\left(XC_f-XL_n\right)}{-jXL_f\cdot XL_n\cdot XC_f+R_n\cdot\left(XL_f\cdot XL_n-XC_f\cdot XL_f-XL_n\cdot XC_f\right)}=Gr(R_n,XL_n)-jGx(R_n,XL_n);$$
$$\delta\dot{G}_m=\dot{G}_m(R_n,XL_n)-\dot{G}_m\left[R_n(1+\gamma_{Zn}),XL_n(1+\gamma_{Zn})\right], \quad (10)$$

где коэффициент γ_{Zn} численно характеризует несимметрию нагрузки и определяется с помощью соотношения $\gamma_{Zn}=\delta R_n/R_n=\delta XL_n/XL_n$, здесь $\delta R_n,\delta XL_n$ – небаланс активного и индуктивного сопротивлений нагрузки.

С учетом соотношения (10), обозначения $\delta\dot{G}_m^*=\delta Gr_m^*-j\delta Gx_m^*$ и введения относительных единиц получим

$$\delta\dot{U}_d^*=\frac{\sum\limits_{m=1}^{3}Me^{j\theta_m}\left(\delta Gr_m^*-j\delta Gx_m^*\right)}{3Gr^*+\sum\limits_{m-1}^{3}\delta Gr_m^*+j\left(\frac{2}{Xc^*}-3Gx^*-\sum\limits_{m-1}^{3}\delta Gx_m^*\right)};$$
$$\dot{U}_d^*=Me^{j\theta_m}-\delta\dot{U}_d^*; \quad (11)$$

$$\dot{I}_0^*=\frac{\sum\limits_{m=1}^{3}Me^{j\theta_m}\left(\delta Gr_m^*-j\delta Gx_m^*\right)}{1-\left[3Gr^*+\sum\limits_{m-1}^{3}\delta Gr_m^*+j\left(\frac{2}{Xc^*}-3Gx^*-\sum\limits_{m-1}^{3}\delta Gx_m^*\right)\right]}.$$

В качестве базовых приняты следующие величины: $U_б=U_d/2$, $G_б=1/Z_{н.ном}$, $I_б=U_бG_б$, где $Z_{нном}$ – номинальное сопротивление нагрузки.

Далее приведены численные оценки влияния несимметрии нагрузки на параметры выходных напряжений для случая, когда несимметричной является только нагрузка в первой фазе ($m=1$), а параметры фильтров и режим работы ИН характеризуются следующими величинами:

$$XC^*=0{,}01;\ XL_f^*=0{,}224;\ XC_f^*=0{,}266;\ M=1;\cos\varphi_n=0{,}8.$$

На рис. 3, *а* представлена зависимость модуля напряжения нулевой последовательности на выходе ИН ($\|\dot{U}_0\|$) и на нагрузке ($\|\dot{U}_{0n}\|$) с учетом коэффициента передачи L_fC_f фильтра, который определялся в соответствии со следующим соотношением:

$$\dot{k}_u(R_n,L_n)=\dot{U}_{mn}^*/\dot{U}_m^*.$$

Данный график наглядно показывает, что фильтр усугубляет влияние несимметрии нагрузки на разбаланс напряжений на выходе системы.

На рис. 3, *б* иллюстрируется влияние изменения амплитудных значений напряжений ИН при изменении коэффициента γ_{Zn}. Как следует из рис. 3, двухпроцентное отклонение амплитудного значения от своей номинальной величины для рассматриваемого примера наблюдается при значениях $0{,}4\ge\gamma_{Zn}\ge1{,}6$. То есть при увеличении нагрузки в первой фазе на 40% больше, чем в других фазах, наблюдается нарушение требований ГОСТ 19705–89 относительно качества генерируемой электрической энергии. Интересно отметить, что несимметрия в первой фазе влияет на величины напряжения двух других фаз, а напряжение первой фазы изменяется минимально. Рисунок 4 показывает характер изменения модуля нулевой последовательности и отклонения амплитудного значения фазы с номером $m=2$ от относительного значения величины *Xc*, фактически иллюстрируется влияние величины конденсатора *C*.

Данные зависимости позволяют определить необходимую величину конденсатора *C,* обеспечивающую заданный разбаланс напряжений.

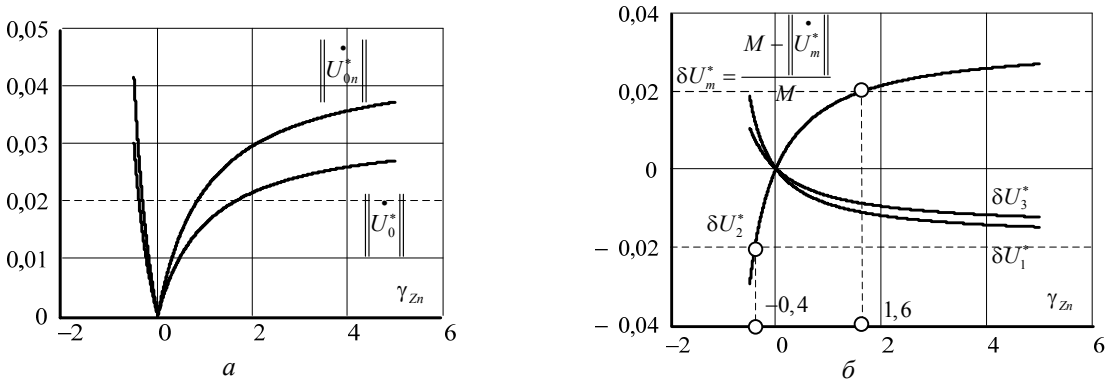

Рис. 3. Зависимость модуля напряжения нулевой последовательности на выходе ИН и на нагрузке от небаланса сопротивлений нагрузки (*а*); изменения амплитудных значений напряжений ИН при изменении небаланса сопротивлений нагрузки (*б*)

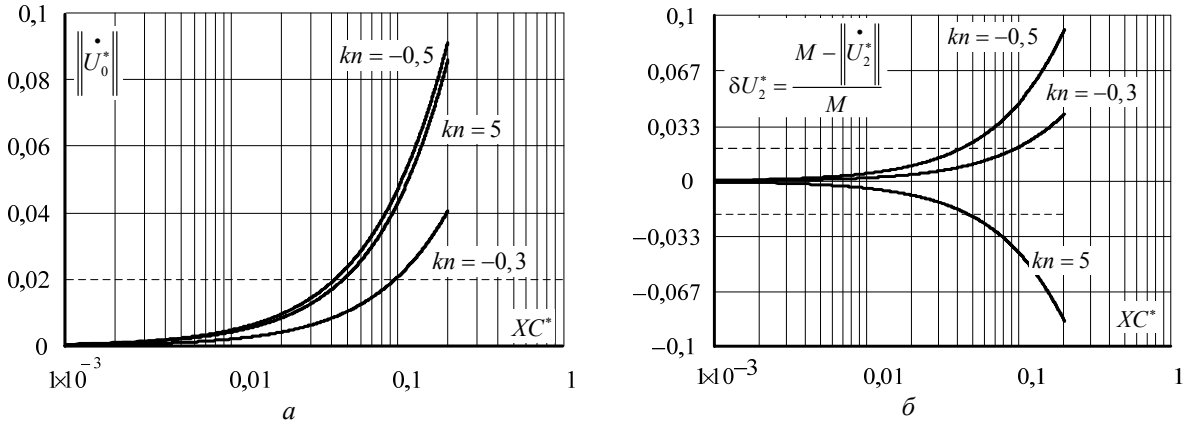

Рис. 4. Зависимость модуля напряжения нулевой последовательности (*а*) и отклонения амплитудного значения фазы с номером $m = 2$ (*б*) от относительного значения величины емкостного сопротивления

Выводы

1. В рассматриваемой системе генерирования токи нулевой последовательности нагрузки приводят к появлению напряжения нулевой последовательности на зажимах инвертора, что связано с возникновением переменной составляющей в звене постоянного тока инвертора.
2. Через конденсаторы фильтра звена постоянного тока возникает обратная связь по основной гармонике выходного напряжения, в режимах несимметричной нагрузки наблюдается значительное межфазное влияние выходных напряжений инвертора и, как следствие, системы в целом.
3. Предложена методика оценки взаимного влияния выходных фаз инвертора по основной гармонике выходного напряжения и получены некоторые количественные результаты.

Работа выполнена по государственному контракту № 13.G36.31.0010 от 22.10.2010 г.

Литература

1. Электрический самолёт: от идеи до реализации / А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв. – М.: Машиностроение, 2010. – 288 с.
2. Система генерирования электрической энергии типа «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, М.А. Маслов и др. // Электротехника. – 2008. – № 6. – С. 27–32.
3. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 536 с. – Серия «Монографии НГТУ».

Грабовецкий Георгий Владимирович
Д-р техн. наук, профессор каф. промышленной электроники
Новосибирского государственного технического университета
Тел.: 8 (383) 346-08-66
Эл. почта: promelec.nstu@gmail.com

Коробков Дмитрий Владиславович
Ассистент каф. промышленной электроники
Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)
Тел.: 8 (383) 346-08-66
Эл. почта: promelec.nstu@gmail.com

Харитонов Сергей Александрович
Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. промышленной электроники НГТУ
Тел.: 8 (383) 346-08-64
Эл. почта: Kharit1@yandex.ru

Grabovetcky G.V., Korobkov D.V., Kharitonov S.A.

Unbalance of load in power electrical system with the voltage inverter

Some results of developing power generation system of electric energy of alternating current for autonomous objects are presented in the paper. Influence of an electric circuit of the three-phase inverter and parameters of its elements on unbalance of voltage is analyzed.
Keywords: power system generation, variable speed – constant frequency, permanent magnet generator, voltage-source inverter, rectifier, unbalance of voltage.