



МОДЕЛИРОВАНИЕ УРАВНИТЕЛЬНЫХ (ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ) ТОКОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВКЛЮЧЕНИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В статье рассмотрено влияние конструкции уравнительных трехфазных индуктивных реакторов на величину циркуляционных токов, протекающих между двумя преобразователями (активными выпрямителями или инверторами), подключенными параллельно на стороне переменного тока и имеющими общее звено постоянного тока. Проведено компьютерное моделирование токов и напряжений для случаев реакторов групповой конструкции и реакторов с трехстержневым магнитопроводом при прочих равных условиях. Сравнительный анализ результатов показал нежелательность использования в качестве уравнительных реакторов с трехстержневым магнитопроводом из-за их малого реактивного сопротивления токам нулевой последовательности.

Трехфазный индуктивный реактор, групповая конструкция, трехстержневой магнитопровод, ток нулевой последовательности, взаимная индуктивность, компьютерное моделирование.

Параллельное включение нескольких инверторов или активных выпрямителей используется в энергетических установках большой мощности [1–2]. Для улучшения формы переменного тока (приближения ее к синусоидальной) используется фазовый сдвиг несущих треугольных напряжений систем управления инверторов или активных выпрямителей при формировании ШИМ напряжений одноименных фаз параллельно включенных преобразователей. Использование такой технологии приводит к уменьшению амплитуды высокочастотных колебаний переменного тока и увеличению их частоты. В свою очередь, это облегчает фильтрацию высокочастотных составляющих тока, в том числе обмотками трансформаторов и электрических машин. Например, для пары параллельно включенных преобразователей фазовый сдвиг управления ключами одноименных фаз составит $T_{\text{ШИМ}} / 2$, то есть 180° , половину периода несущего сигнала ШИМ. Такой алгоритм ШИМ именуют несимметричным, при нем в общем случае обеспечивается фазовый сдвиг несущих сигналов на угол равный $2\pi / k$, где k – число параллельно включенных преобразователей.

В ряде случаев параллельно включенные преобразователи подключают к одному источнику постоянного напряжения (общему звену постоянного напряжения). При этом возникают уравнительные (циркуляционные) токи между инверторами или активными выпрямителями, протекающие по одноименным фазам преобразователей. Эти токи становятся причиной перегревов индуктивных и емкостных компонентов, повышенного падения напряжения, перегрузок по току полупроводниковых ключей.

С другой стороны, даже если не применять фазовый сдвиг несущих напряжений при формировании ШИМ параллельно включенных преобразователей (использовать синхронное управление ключами), то невозможно гарантировать идентичность напряжений одноименных фаз преобразователей ввиду неидентичности параметров последних. Поэтому возникновение уравнительных (циркуляционных) токов между преобразователями не исключено и при синхронном управлении ключами [3].

С целью ограничения уравнительных (циркуляционных) токов на выходе переменного тока каждого преобразователя, подключаемого параллельно, в каждой фазе присоединяют уравнительные реакторы [5, 6]. Заодно реакторы сглаживают пульсации токов, которыми преобразователи обмениваются с сетью (источником) переменного напряжения. К точке подключения реакторов каждой фазы иногда подключают фильтровые конденсаторы [4].

Исходя из закона Ома, уменьшить величину тока можно двумя способами: 1) уменьшить разность потенциалов, вызывающую протекание тока; 2) увеличить сопротивление пути, по которому течет ток. В [5] предложено программно-аппаратное дополнение к системе параллельно включенных преобразователей, согласующее их работу в части избавления от протекания уравнительных токов. Сопротивление же уравнительному (циркуляционному) току, оказывается, зависит от конструкции уравнительных реакторов.

Уравнительные (циркуляционные) токи в рассматриваемом случае представляют собой токи нулевой последовательности [6]. Циркулируя между преобразователями, они не проникают в сеть переменного тока. Мгновенные токи нулевой последо-

вательности во всех фазах одинаковы по направлению и величине.

Как известно, трехфазный индуктивный реактор с магнитопроводом подобно трехфазному трансформатору можно получить, используя (рис. 1): 1) три однофазных реактора каждый на индивидуальном магнитопроводе; 2) трехфазный реактор на общем для фаз трехстержневом магнитопроводе; 3) трехфазный реактор на общем для фаз броневом или бронестержневом магнитопроводе (практически получили распространение пятистержневой и четырехстержневой магнитопроводы). На рисунке 1 показаны пути замыкания магнитных потоков нулевой последовательности фаз для трехфазных реакторов при разной конфигурации магнитопровода: трехстержневой, броневой, бронестержневой с пятью стержнями, групповой.

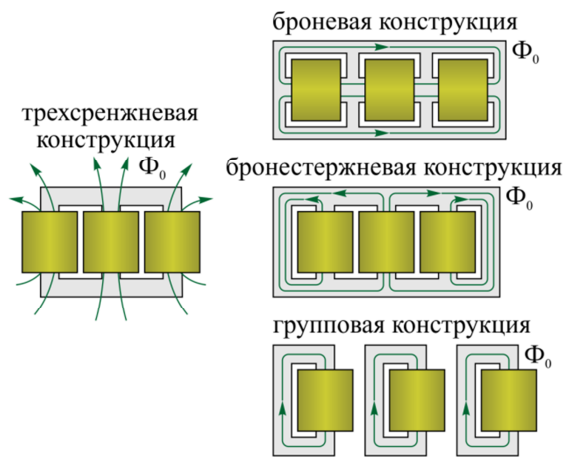


Рис. 1. Пути замыкания магнитных потоков нулевой последовательности в трехфазных индуктивных реакторах с различными конструкциями магнитопроводов

На рисунке 2 изображены пути замыкания магнитных потоков нулевой последовательности фаз для трехфазного реактора с магнитопроводом бронестержневой конструкции с четырьмя стержнями.

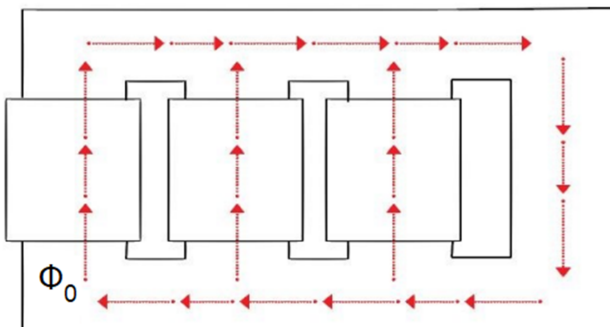


Рис. 2. Пути замыкания магнитных потоков нулевой последовательности в трехфазном реакторе с четырехстержневым магнитопроводом

На рисунке 3 показан общий вид трехфазного индуктивного реактора с четырехстержневым магнитопроводом.

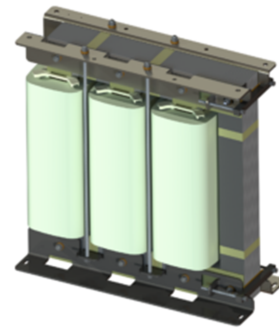


Рис. 3. Общий вид трехфазного индуктивного реактора с четырехстержневым магнитопроводом

Четвертый стержень магнитопровода может не нести обмотки (рис. 3), но может также содержать некоторое количество витков, что приводит к более высокой индуктивности для токов нулевой последовательности.

При допущении об одинаковости параметров каждой фазы индуктивного реактора (конструктивной симметрии) уравнения в матричной форме по второму закону Кирхгофа для трехфазного реактора групповой конструкции без учета потерь в стали можно записать в виде:

$$\begin{cases} u_a \\ u_b \\ u_c \end{cases} = \begin{vmatrix} L + L_\sigma & 0 & 0 \\ 0 & L + L_\sigma & 0 \\ 0 & 0 & L + L_\sigma \end{vmatrix} \times \begin{cases} p \cdot i_a \\ p \cdot i_b \\ p \cdot i_c \end{cases} + \begin{vmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{vmatrix} \begin{cases} i_a \\ i_b \\ i_c \end{cases}, \quad (1)$$

где r – активное сопротивление фазы;
 L – собственная индуктивность фазы;
 L_σ – индуктивность рассеяния фазы.

Уравнения (1) справедливы также для трехфазных индуктивных реакторов на четырех- и пятистержневых магнитопроводах, условия чего пояснены в. Ввиду того, что в вышеуказанных конструкциях реакторов магнитные потоки любой последовательности, включая нулевую, замыкаются по стали магнитопроводов, параметры цепи для протекания тока любой последовательности в фазе также будут одинаковы.

Аналогичные уравнения для 3-фазного индуктивного дросселя с трехстержневым магнитопроводом:

$$\begin{cases} u_a \\ u_b \\ u_c \end{cases} = \begin{vmatrix} L + L_\sigma & M & M \\ M & L + L_\sigma & M \\ M & M & L + L_\sigma \end{vmatrix} \times \begin{cases} p \cdot i_a \\ p \cdot i_b \\ p \cdot i_c \end{cases} + \begin{vmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{vmatrix} \begin{cases} i_a \\ i_b \\ i_c \end{cases}, \quad (2)$$

где M – взаимная индуктивность двух фаз.

В работах [19, 23] принято соотношение

$$M = -\frac{L}{2}. \quad (3)$$

Используя принятые ранее допущения, уравнения (1) и (2) с учетом (3) могут быть получены из уравнений трехфазного трансформатора.

В уравнениях (2) с учетом (3) обратим теперь внимание, что для тока нулевой последовательности в каждой из фаз в качестве индуктивности остается только индуктивность рассеяния, которая обычно на один – два порядка меньше собственной индуктивно-

сти реактора (см. уравнение (4)). Это приведет к очень низкому комплексному сопротивлению фаз трехфазного реактора на трехстержневом магнитопроводе токам нулевой последовательности, что чревато существенным ростом величины этих токов вне зависимости от их частоты.

$$\begin{pmatrix} u_{a0} \\ u_{b0} \\ u_{c0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L+L_c & -\frac{1}{2}L & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{1}{2}L & L+L_c & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{1}{2}L & -\frac{1}{2}L & L+L_c \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} p \cdot i_0 \\ p \cdot i_0 \\ p \cdot i_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для некоторых конструктивных исполнений трехфазных реакторов соотношение (3) может быть иным. Ввиду этого не столь мало будет комплексное сопротивление фаз нулевой последовательности. Например, в [22, Table C.1] для 3-фазного индуктивного реактора с трехстержневым магнитопроводом с зазором при жидкостном охлаждении и с магнитным экранированием стенками бака реактивное сопротивление току нулевой последовательности указано в пределах (70 ... 76) % от номинального реактивного сопротивления реактора. Во всяком случае, даже

при наличии путей прохождения потоков нулевой последовательности по стальным деталям бака, сопротивление токам нулевой последовательности остается заметно меньшим по сравнению с прямой и обратной последовательностями.

Выполним компьютерное моделирование параллельной работы пары активных выпрямителей на сеть переменного тока согласно рисунку 4 с несимметричным алгоритмом ШИМ. Приняты следующие условные обозначения: АВ1 и АВ2 – активные выпрямители, $L1$ и $L2$ – уравнивательные индуктивные реакторы, T – трансформатор трехфазный Δ/Y_H-11 связи с сетью, C – конденсаторы фильтра. Несущая частота ШИМ каждого АВ составляет 1500 Гц.

Далее приведем результаты компьютерного моделирования токов и напряжений схемы на рисунке 4. Все расчетные осциллограммы показаны за период напряжения сети частотой 50 Гц. Если для какого-либо рисунка отсутствуют указания конструктивных особенностей уравнивательных реакторов, это означает, что полученные графики одинаковы для реакторов групповой конструкции и с трехстержневым магнитопроводом.

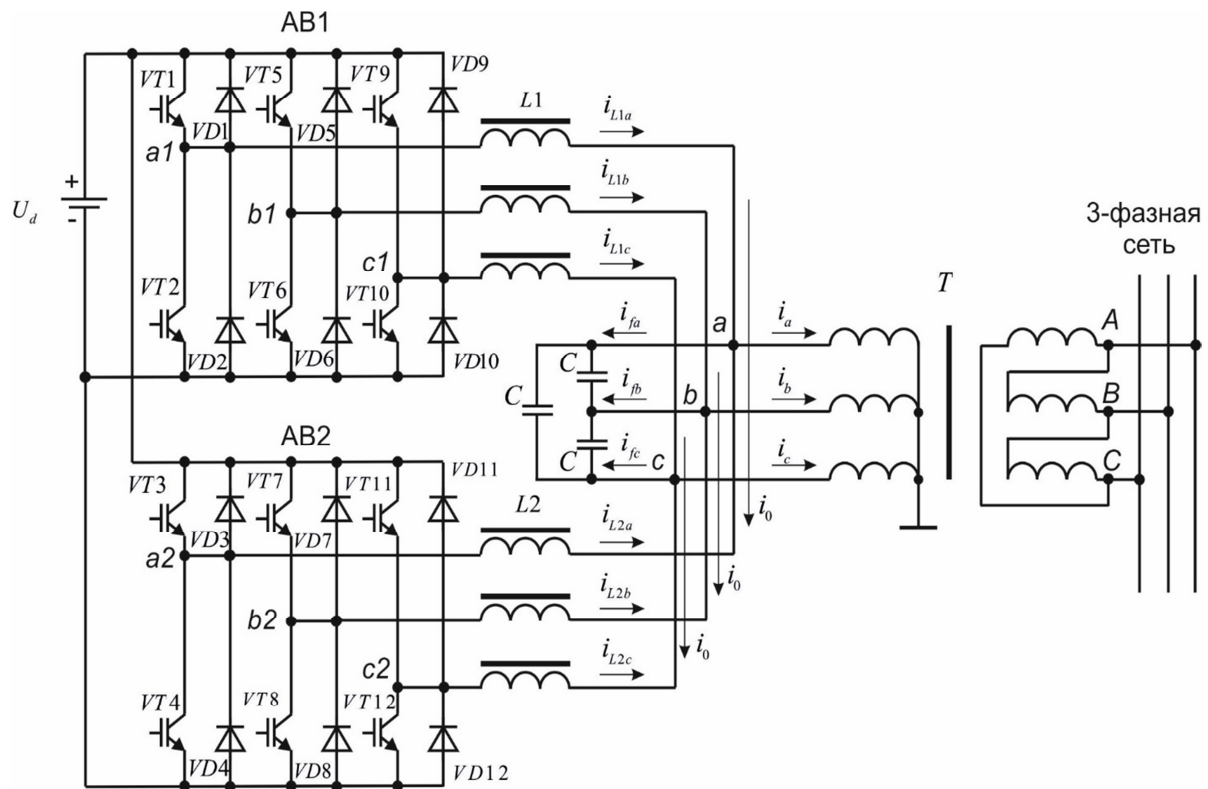


Рис. 4. Схема для компьютерного моделирования в Matlab параллельной работы пары активных выпрямителей с несимметричным алгоритмом ШИМ на сеть переменного тока

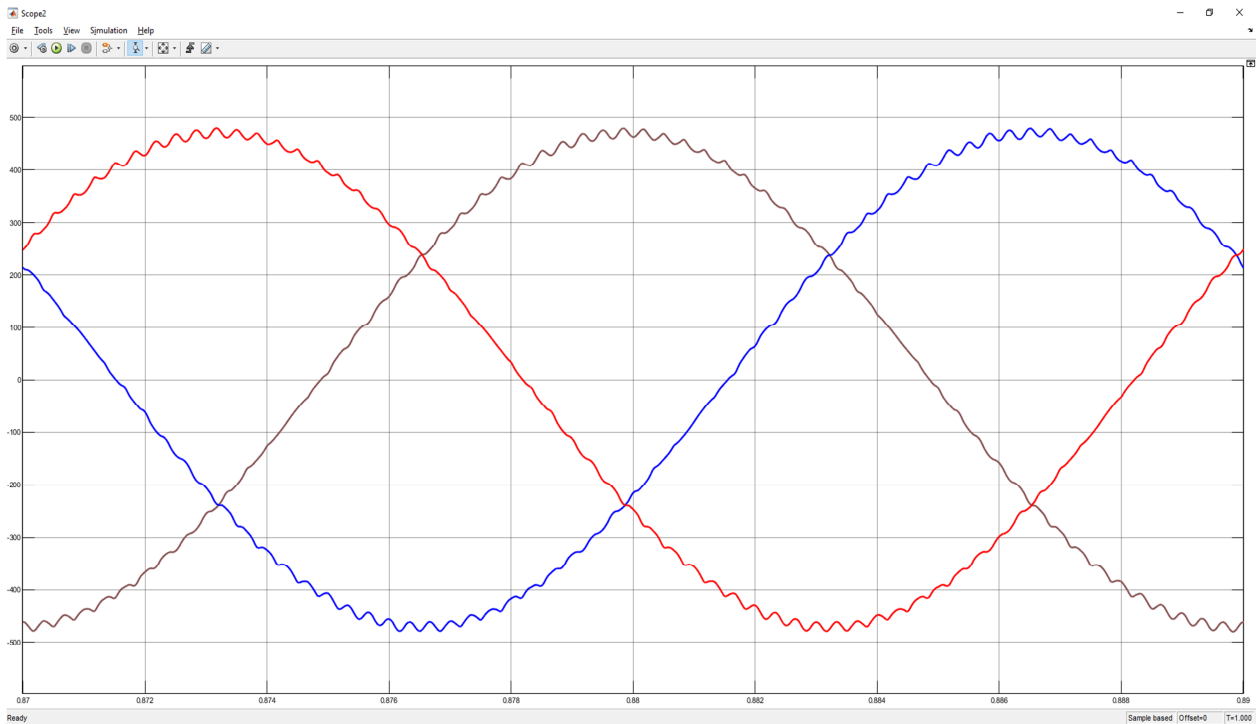


Рис. 5. Результаты моделирования напряжений всех фаз T на вторичной обмотке относительно земли u_a, u_b, u_c

Рисунок 5 показывает результаты моделирования напряжений и токов на вторичной обмотке T (обмотка со схемой Y_H). Параметры уравнительных индуктивных реакторов групповой конструкции и с трехстержневым магнитопроводом взяты одинаковыми: $r = 0,01$ Ом; $L = 0,0003$ Гн; $L_\sigma = 0,00003$ Гн. Емкость конденсатора фазы фильтра $C = 165$ мкФ. Мощность трансформатора с магнитопроводом трехстержневой конструкции 1,6 МВт, напряжение сетевой обмотки – 6 кВ, обмотки низшего напряжения – 0,58 кВ.

Анализируя амплитуды токов, можно заметить, что при групповой конструкции реактора ток в 1,44 раза больше, чем при трехстержневом магнитопроводе.

Для получения условий формирования той же величины тока при использовании трехфазного индуктивного реактора с трехстержневым магнитопроводом, что и при уравнениях (1), то есть с групповым реактором, используем систему уравнений (5):

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} L+L_\sigma & M & M \\ M & L+L_\sigma & M \\ M & M & L+L_\sigma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p \cdot i_a \\ p \cdot i_b \\ p \cdot i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Если учесть, что собственная индуктивность пропорциональна квадрату числа витков, то в случае изменения только числа витков при прочих равных

условиях по сравнению с уравнениями (1) активные сопротивления нужно будет умножить на $\sqrt{\frac{2}{3}}$. Однако при принятых в нашем случае значениях параметров реакторов такое изменение не влечет видимых последствий в результатах моделирования.

Нужно отметить, что практически полное совпадение токов дает использование для моделирования реакторов с трехстержневым магнитопроводом выражений (6):

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}L+L_\sigma & \frac{2}{3}M & \frac{2}{3}M \\ \frac{2}{3}M & \frac{2}{3}L+L_\sigma & \frac{2}{3}M \\ \frac{2}{3}M & \frac{2}{3}M & \frac{2}{3}L+L_\sigma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p \cdot i_a \\ p \cdot i_b \\ p \cdot i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Далее в этой статье для всех случаев моделирования реакторов групповой конструкции применены выражения (1), а для реакторов с трехстержневым магнитопроводом – выражения (5).

На рисунке 6 показаны результаты моделирования линейных токов конденсаторов, включенных параллельно T . Нулевая составляющая в токах отсутствует.

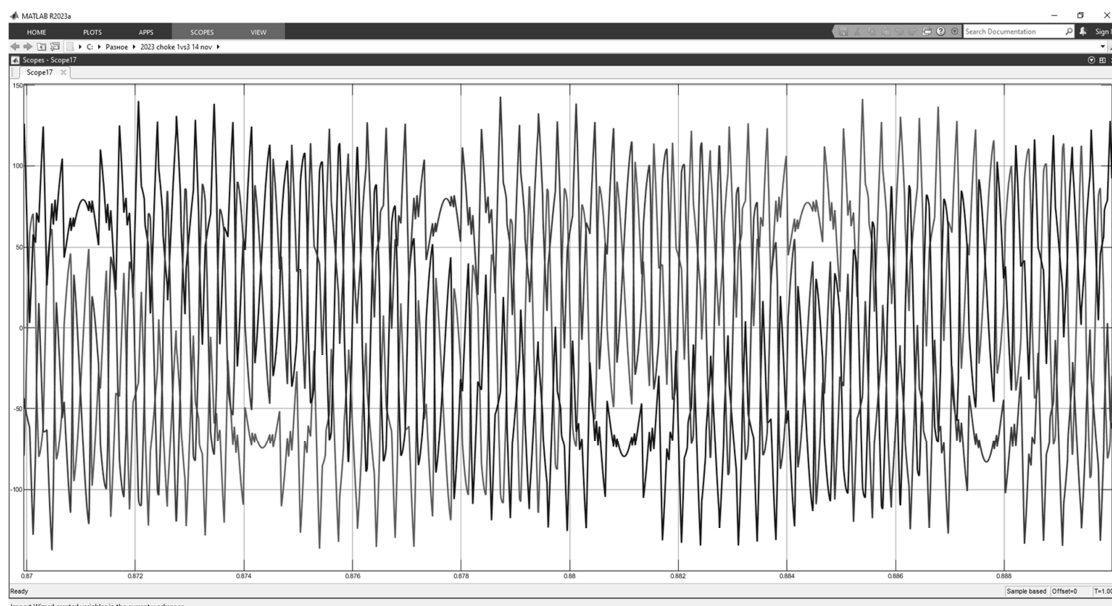


Рис. 6. Результаты моделирования линейных токов емкостного фильтра i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}

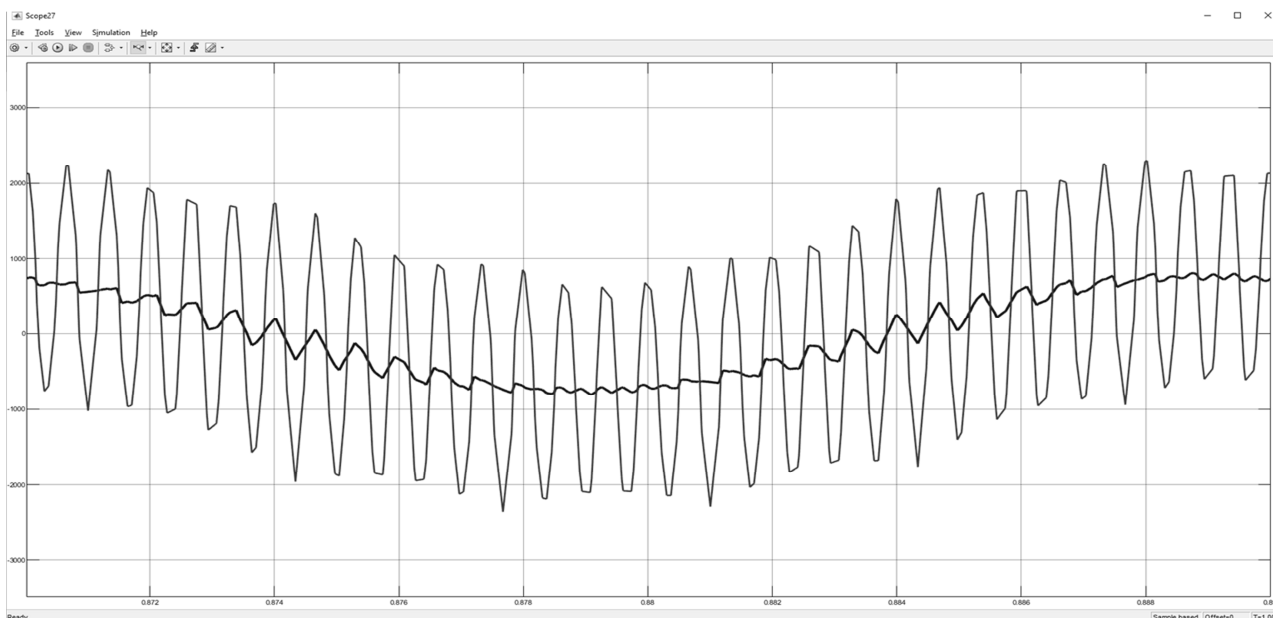


Рис. 7. Результаты моделирования тока i_{L1a} при групповой конструкции $L1$ (малая амплитуда) и трехстержневой конструкции $L1$ (большая амплитуда)

Из рисунка 7 видно, что ток i_{L1a} при групповой конструкции $L1$ (малая амплитуда) имеет мгновенные значения значительно ниже, чем при трехстержневой конструкции $L1$ (большая амплитуда).

При групповой конструкции уравнительных реакторов результаты моделирования токов фаз $L1$ и $L2$. Токи всех фаз каждого реактора синфазную составляющую на частоте 1500 Гц – 30-я гармоника, величина которой превышает величину основной гармоники более чем в 2 раза. Это и есть уравнительные (циркуляционные) токи i_0 . В последнем случае амплитуда i_0 в 15 раз больше. Обратим внимание, что в рассматриваемом нами случае ток нулевой по-

следовательности является четной гармоникой с номером 30.

Дополнительно было проведено компьютерное моделирование для ситуации, когда каждый АВ имеет собственный источник постоянного напряжения и гальванически не связан на стороне постоянного тока с другим АВ. Как и ранее использован несимметричный алгоритм ШИМ. Результаты моделирования показывают, что все токи содержат переменную составляющую на частоте 1500 Гц. Нулевая последовательность токов отсутствует.

Выводы

В системе параллельно включенных трехфазных активных выпрямителей с несимметричным алгорит-

мом ШИМ, имеющих общее звено постоянного тока и электрическую связь на стороне переменного тока, нежелательно использование уравнивающих индуктивных реакторов с трехстержневым магнитопроводом. Желание применять такие реакторы обусловлено их компактностью.

Причина нежелательности – чрезвычайно высокие значения уравнивающих (циркуляционных) токов, которые являются токами нулевой последовательности. Приемлемой альтернативой является использование групповых реакторов либо реакторов с пяти- или четырехстержневыми магнитопроводами. В этих конструкциях обеспечивается замыкание магнитных потоков нулевой последовательности по стали магнитопровода.

При использовании все же уравнивающих индуктивных реакторов с трехстержневым магнитопроводом они должны быть дополнены дросселями нулевой последовательности [7] или фильтром нулевой последовательности [8], что может свести на нет ожидаемый выигрыш в массогабаритных показателях.

Разделение параллельно включенных активных выпрямителей по звену постоянного тока аннулирует протекание токов нулевой последовательности. Но разделение звена постоянного тока не всегда целесообразно.

Автор благодарит Горского Алексея Алексеевича (АО «Силовые машины») за идею исследования и предоставленную для анализа компьютерную модель.

Литература

1. Пустоветов, М. Ю. Анализ потерь тягового трансформатора электровоза при параллельной работе четырехквadrантных преобразователей / М. Ю. Пустоветов, К. П. Солтус // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 3 (35). – С. 31–41.

2. Jiang, Y. Control of circulating current in parallel three-phase inverter in MW wind power system / Y. Jiang, S. Xiong, S. Dao Huang, K.Y. Huang, L. Xiao // 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems, Incheon, Korea (South). – 2010. – Pp. 133–136.

3. Ma, Y. Circulating current control and reduction in a paralleled converter test-bed system / Y. Ma, L. Yang, J. Wang, X. Shi, F. Wang, L.M. Tolbert // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA. – 2013. – Pp. 5426–5432. – <https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6647437>.

4. Бачурин, П. А. Активный выпрямитель в системе электропитания постоянного тока с магнитоэлектрическим генератором / П. А. Бачурин, Д. В. Коробков, С. А. Харитонов // Электропитание. – 2014. – № 3. – С. 7–12.

5. Porkia H. A. Elimination of Circulating Current in a Parallel PWM Rectifier Using an Interface Circuit / H. A. Porkia, J. Adabi, F. Zare // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2022. – Vol. 37. – No. 1. – Pp. 264–273. – <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3099743>.

6. Mazumder, S. K. Continuous and discrete variable-structure controls for parallel three-phase boost rectifier / S. K. Mazumder // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2005. – Vol. 52. – No. 2. – Pp. 340–354. – <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.843921>.

7. Heldwein, M. L. The Three-Phase Common-Mode Inductor: Modeling and Design Issues / M. L. Heldwein, L. Dalessandro, J. W. Kolar // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58. – No. 8. – Pp. 3264–3274.

8. Smolenski, R. Compensation of CM voltage in systems consisting of interleaved AC-DC converters / R. Smolenski, M. Jasinski, M. Jarnut, J. Bojarski, C. Cecati // 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey. – 2014. – pp. 1996–2001. – <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864923>.

M.Yu. Pustovetov

Don State Technical University

SIMULATION OF EQUALIZING (CIRCULATING) CURRENTS WITH PARALLELY CONNECTED CONVERTERS

The article examines the influence of the design of equalizing three-phase inductive reactors on the magnitude of circulating currents flowing between two converters (active rectifiers or inverters) connected in parallel on the AC side and having a common DC link. Computer simulation of currents and voltages was carried out for the cases of bank of three single-phase reactors and reactors with a three limb magnetic core, all other things being equal. A comparative analysis of the results showed the undesirability of using three limb cores as equalizing reactors due to their low zero-sequence reactance.

Three-phase inductive reactor, bank of three single-phase reactors, three-legged magnetic core, common mode current, mutual inductance, computer simulation.