

УЧЕТ ПРОЦЕССОВ «ЗАКАЧКИ» ЭНЕРГИИ ПРИ ВЫБОРЕ ИНДУКТИВНОСТИ ФАЗНЫХ РЕАКТОРОВ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ – ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина

Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт»

Кафедра ПБМЭ, НТУ «ХПИ», ул. Фрунзе 21, г. Харьков, 61002, Украина

Тел./факс: (057) 707-63-12, E-mail: zhemerov@gmail.com

Д.В. Тугай

Харьковская национальная академия городского хозяйства

Кафедра ТОЭ, ХНАГХ, ул. Революции 12, г. Харьков, 61002, Украина

Тел.: (057) 707-31-11, E-mail: tugai_d@ukr.net

Annotation – In this paper the feature of electromagnetic processes in active rectifier are considered and rated generalized methodology for reactors inductance selection, supplied both constant and variable PWM control system.

Key words – Active rectifier, hysteresis control system, modulation frequency, pumping energy, reactor inductance.

ВВЕДЕНИЕ

Ужесточение требований к качеству электроэнергии, регламентированных современными стандартами, отразилось на повсеместном распространении нового класса преобразовательных устройств с близким к единице коэффициентом мощности. В энергетике, в промышленных установках, на транспорте и прочих областях, где необходимы преобразователи переменного напряжения в постоянное все чаще используется активный выпрямитель – источник напряжения (АВИН) [1], [2]. Простота и малоэлементность силовой схемы при хорошей электромагнитной совместимости с питающей сетью сделали АВИН одним из основных элементов современных преобразовательных систем средней и большой мощности с неглубоким регулированием выходного напряжения.

Построение систем управления активным выпрямителем (АВ) связано с учетом параметров силовой схемы, и поэтому выбору последних необходимо уделить особое внимание. Одним из основных параметров, влияющим на электромагнитные процессы в силовой схеме АВИН, является величина эквивалентной индуктивности фазного реактора, рассчитанная с учетом индуктивности сети.

Целью настоящей статьи является получение расчетных соотношений обобщенной методики выбора индуктивности фазных реакторов АВИН, способного работать как с постоянной, так и с переменной частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

ПРОЦЕССЫ «ЗАКАЧКИ» ЭНЕРГИИ В АВИН

Схема силовых цепей активного выпрямителя – источника напряжения представлена на рис. 1. К клеммам A , B , C трехфазной питающей сети синусоидальных симметричных напряжений u_{sa} , u_{sb} , u_{sc} через реакторы L_R подключен выпрямительный мост, состоящий из шести транзисторно-диодных модулей $T1-T6$, $D1-D6$. На выходе моста включены два конденсатора одинаковой емкости $C1$ и $C2$, общая точка которых N соединена с общей точкой трехфазного источника. Напряжение на выходном конденсаторе U_0 всегда устанавливается выше амплитуды линейного напряжения источника питания:

$$U_0 = k \cdot \sqrt{3} \cdot U_{sm} \quad (1)$$

где U_{sm} – амплитуда фазного напряжения сети; $k = 1.2-1.6$.

Выпрямитель работает на активную нагрузку R_{Load} .

В зависимости от знака фазного напряжения для вентиля каждой фазы возможны четыре состояния эквивалентной схемы, в которых открытыми поочередно оказывается транзистор и диод [4]. Особенность электромагнитных процессов в схеме АВИН удобно рассмотреть на примере одной фазы. На рис. 2 представлена эквивалентная схема фазы *A* активного выпрямителя при положительном фазном напряжении $u_s > 0$. Не участвующие в работе полупроводниковые приборы для рассматриваемого случая на рис. 2 не показаны. В эквивалентной схеме учитываются суммарная индуктивность L_Σ и суммарное омическое сопротивление R_Σ фазы *A*

$$\begin{aligned} L_\Sigma &= L_S + L_R, \\ R_\Sigma &= R_S + R_R \end{aligned} \quad (2)$$

где L_S , R_S и L_R , R_R – соответственно индуктивности и активные сопротивления источника и реактора.

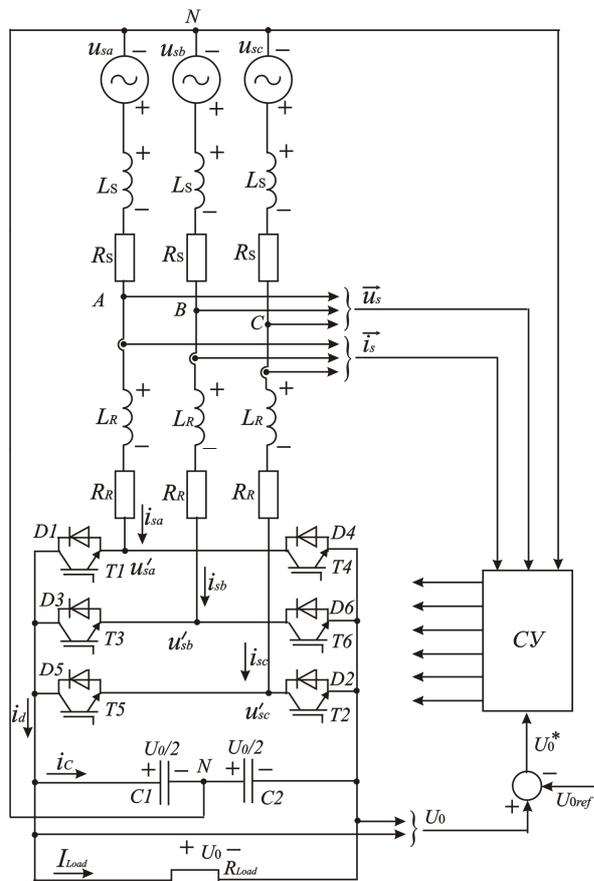


Рис. 1

Последовательность электромагнитных процессов в схеме по рис. 2 можно условно разбить на два этапа, соответствующих интервалам проводимости транзистора и диода:

- при открытом транзисторе *T4* энергия, запасенная в конденсаторе *C2*, а также энергия источника u_s передается в реактор L_Σ ;

- при закрытом транзисторе *T4* диод *D1* оказывается в проводящем состоянии и энергия, накопленная в реакторе, а также дополнительная энергия источника передаются в нагрузку.

Работа эквивалентной схемы активного выпрямителя по рис. 2 напоминает работу повышающего преобразователя постоянного напряжения, с тем лишь отличием, что энергия в реактор поступает не только от источника, но и из конденсатора, ускоряя, тем самым, процесс «закачки».

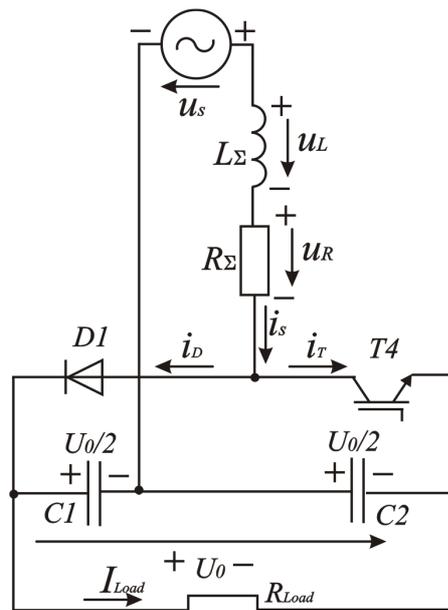


Рис. 2

Рассмотрим особенности работы АВИН, способного работать как с постоянной ($f_{mod} = \text{const}$), так и с переменной ($f_{mod} = \text{var}$) частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рис. 3,а представлены кривые мгновенного фазного тока выпрямителя при постоянной частоте ШИМ, а на рис. 3,б при переменной частоте ШИМ, когда напряжение источника u_s положительно и растет. Ток задания i_s^*

изменяется по синусоидальному закону с частотой напряжения источника u_s , что на два порядка ниже частоты ШИМ. Поэтому ток задания представлен на рис. 3 прямой линией с небольшим положительным углом наклона $\Delta\alpha$. Из рис.3 видно, что при постоянной частоте ШИМ изменяется величина максимального отклонения тока фазы от синусоидального тока задания ΔI_s , а при переменной частоте – период повторяемости высокочастотной составляющей электромагнитных процессов T_{mod} . В таблице 1 приведены результаты сопоставления рис. 3,а и рис. 3,б.

Таблица 1

$f_{mod}=\text{const}$	$T_{mod1}=T_{mod2}$	$\Delta I_{s1}>I_{s2}$	$\gamma_1>\gamma_2$	$\beta_1=\beta_2$	$S_1>S_2$
$f_{mod}=\text{var}$	$T_{mod1}<T_{mod2}$	$\Delta I_{s1}=I_{s2}$	$\gamma_1>\gamma_2$	$\beta_1=\beta_2$	$S_1<S_2$

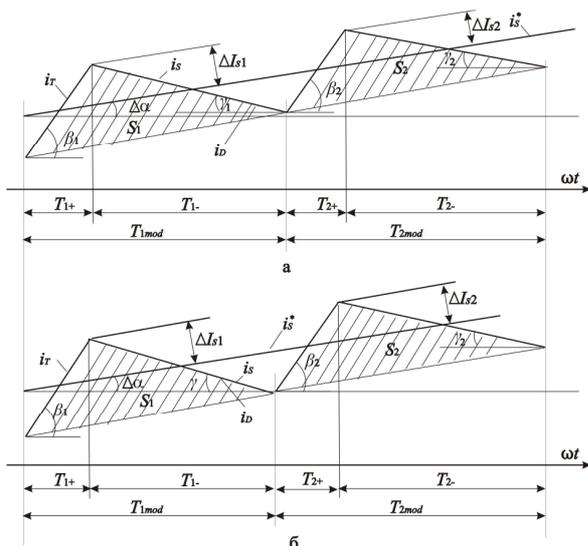


Рис. 3

При положительном растущем напряжении u_s мгновенная активная мощность источника в интервале времени T_- больше, мгновенной активной мощности источника в интервале T_+

$$P_{s-\uparrow} > P_{s+\uparrow}, \quad (3)$$

следовательно, имеет место «закачка» энергии из реактора в конденсатор.

Процессы «закачки» поддерживаются в том случае, если энергия, отдаваемая реактором в конденсатор в интервале времени T_- больше энергии, забираемой в интервале времени T_+ из конденсатора C_2 в реактор

$$E_{C-} > E_{C+}. \quad (4)$$

Когда u_s положительно и убывает мгновенная активная мощность источника в интервале T_- меньше, мгновенной мощности источника в интервале T_+

$$P_{s-\downarrow} < P_{s+\downarrow}, \quad (5)$$

однако, за счет энергии, накопленной в реакторе за четверть периода напряжения источника, механизм «закачки» не нарушается и соотношение (4) выполняется.

Для корректной работы АВИН необходимо, чтобы в интервале времени, равном половине периода напряжения источника, приращение энергии, запасаемой в реакторе при положительном растущем напряжении источника, соответствовало приращению энергии, отдаваемой реактором в нагрузку и конденсатор при положительном убывающем напряжении источника

$$\Delta E_{L\uparrow} = \Delta E_{L\downarrow}. \quad (6)$$

Чем ближе мгновенное напряжение источника u_s к амплитудному значению U_{sm} , тем больше энергии передается из реактора в нагрузку. Угол наклона кривой мгновенного фазного тока γ в интервале времени T_- уменьшается ($\gamma_1 > \gamma_2$, см. рис. 3), мгновенный ток стремится к току задания и меняется незначительно $i_s \cong i_s^* \cong \text{const}$, продолжительность самого интервала увеличивается, что, в свою очередь, сказывается на уменьшении интервала T_+ , когда энергия запасается в реакторе. Скорость «закачки» энергии в реактор остается постоянной и угол наклона кривой мгновенного фазного тока β в интервале T_+ не изменяется ($\beta_1 = \beta_2$, см. рис. 3).

При $f_{mod}=\text{var}$ уменьшение угла наклона γ связано с уменьшением частоты ШИМ f_{mod} , а при $f_{mod}=\text{const}$ – с уменьшением максимального отклонения тока фазы от синусоидального тока задания ΔI_s .

Таким образом, правильный выбор индуктивности реактора обеспечивает эффективность работы схемы АВИН. При значительной индуктивности образуется избыток «закаченной» в реактор энергии, а при малой индуктивности конденсатор не зарядится до нужного напряжения (1).

УЧЕТ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

При выборе индуктивности фазного реактора АВИН необходимо учитывать особенности работы схемы, связанные с наложением низкочастотных и высокочастотных электромагнитных процессов.

Особенностью работы активного выпрямителя является тождественное равенство амплитуды основной гармоники напряжения на входе преобразователя и амплитуды соответствующего фазного напряжения [4]:

$$U'_{s1m} = U_{sm}. \quad (7)$$

Если учитывать, что сетевые токи совпадают по фазе с соответствующими фазными напряжениями, то условие (7) накладывает ограничение на величину индуктивности фазного реактора.

В реальных установках величина индуктивности зависит от многих факторов и в процессе работы преобразователя может изменяться. Векторная диаграмма, поясняющая этот режим работы схемы АВ по рис. 2, представлена на рис. 4. При изменении индуктивности реактора в схеме по рис. 2 из-за необходимости выдерживать соотношение (7) появляется незначительный угол сдвига φ между фазным током и напряжением источника u_s .

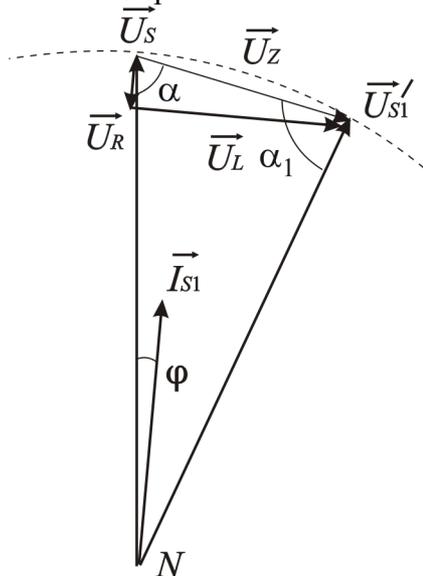


Рис. 4

В работе [6] из векторной диаграммы была получена зависимость между углом

сдвига и относительным значением суммарной индуктивности для АВИН с единичным КПД

$$\varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L_{\Sigma 1*}}{R_{\Sigma}} - \arccos \frac{k^2 \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + \omega^2 \cdot L_{\Sigma 1*}^2}}{R_{Load}}, \quad (8)$$

где

$$L_{\Sigma 1*} = \frac{L_{\Sigma 1}}{L_{\Sigma cp}} \quad (9)$$

относительное значение суммарной индуктивности,

$$L_{\Sigma 1p} = \frac{\sqrt{\frac{R_{\Sigma} \cdot R_{Load}}{k^2} - R_{\Sigma}^2}}{\omega} \quad (10)$$

суммарная расчетная индуктивность при $\cos \varphi = 1$;

ω – угловая частота; R_{Load} – сопротивление нагрузки.

Для АВИН номинальной мощностью 11.2 kW на рис. 5,а представлены зависимости коэффициента сдвига $\cos \varphi$ от относительной суммарной индуктивности при разных значениях коэффициента k и фиксированном значении сопротивления нагрузки, а на рис. 5,б – при разных сопротивлениях нагрузки и фиксированном значении коэффициента k .

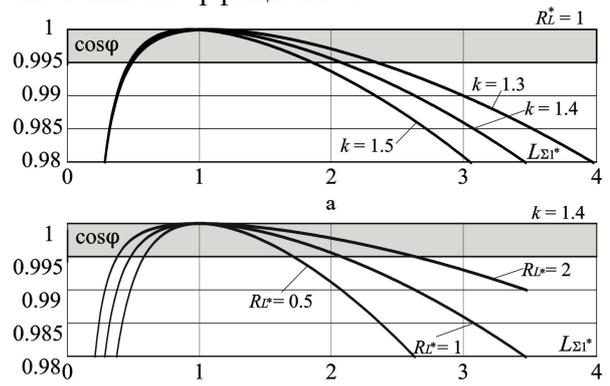


Рис. 5

Снижение $\cos \varphi$ более чем на 0.5% вызывает увеличение амплитуды основной гармоники напряжения на входе моста, и соотношение (7) не выдерживается. Возможный диапазон изменения относительной индуктивности выделен на рис. 5 серым прямоугольником. Из рис. 5 видно,

что увеличение коэффициента k и уменьшение сопротивления нагрузки сужают рабочий диапазон изменения индуктивности $L_{\Sigma 1}$.

УЧЕТ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Высокочастотные электромагнитные процессы в схеме АВИН связаны с рассмотренным выше механизмом «закачки», происходящем на частоте переключения транзисторов. В соответствии с рис. 3, величина расчетной индуктивности $L_{\Sigma 2}$ зависит от четырех параметров: частоты модуляции, максимального отклонения тока ΔI_s , коэффициента k и текущего значения фазного напряжения [4]:

$$L_{\Sigma 2} = \frac{\frac{3}{4} \cdot k^2 \cdot U_{sm}^2 - u_s^2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot k \cdot f_{mod} \cdot \Delta I_s \cdot U_{sm}}. \quad (11)$$

Интерпретируя соотношение (11) для АВ с $f_{mod} = \text{var}$ в периоде повторяемости, можно определить среднее значение частоты модуляции $f_{mod, cp}$, служащее основанием для дальнейшего выбора индуктивности $L_{\Sigma 2}$

$$f_{mod, cp} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{sm}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot k \cdot L_{\Sigma 2} \cdot \Delta I_s} \times \int_0^{\pi/2} \left(\frac{3}{4} \cdot k^2 - \sin^2 t \right) dt. \quad (12)$$

Учитывая, что КПД АВИН близок к единице, можно считать справедливым соотношение

$$U_{sm} \cong \frac{I_{s1} \cdot R_{Load}}{\sqrt{2} \cdot k^2}, \quad (13)$$

где I_{s1} – действующее значение основной гармоники сетевого тока.

После интегрирования (12) и дальнейшего преобразования с учетом (13) окончательно получаем

$$f_{mod, cp} = \frac{R_{Load} \cdot (3 \cdot k^2 - 2)}{16 \cdot \sqrt{3} \cdot k^3 \cdot \Delta I_{S*} \cdot L_{\Sigma 2*}}, \quad (14)$$

где

$$\Delta I_{S*} = \frac{\Delta I_S}{I_{S1m}} = \frac{\Delta I_S}{\sqrt{2} \cdot I_{S1}} - \quad (15)$$

относительная величина максимального отклонения фазного тока;

$$L_{\Sigma 2*} = \frac{L_{\Sigma 2}}{L_{\Sigma cp}} - \quad (16)$$

относительное значение суммарной индуктивности при учете высокочастотных электромагнитных процессов.

Аналогичным образом выводится соотношение для среднего значения максимального отклонения тока при $f_{mod} = \text{const}$

$$\Delta I_{s, cp*} = \frac{R_{Load} \cdot (3 \cdot k^2 - 2)}{16 \cdot \sqrt{3} \cdot k^3 \cdot f_{mod} \cdot L_{\Sigma 2}}. \quad (17)$$

На рис. 6 представлено семейство зависимостей частоты ШИМ от относительного значения суммарной индуктивности $L_{\Sigma 2}$ при разных значениях величины ΔI_{S*} , построенных по соотношению (14).

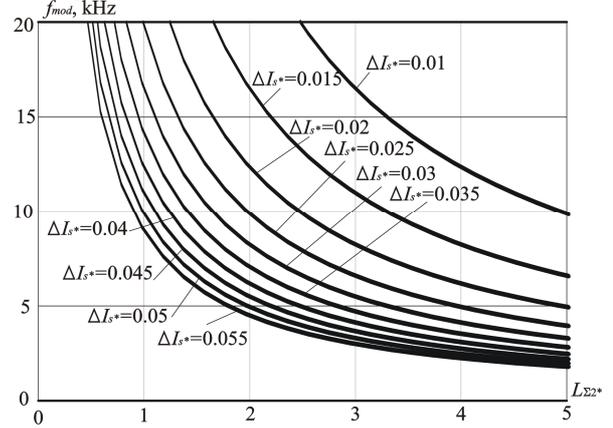


Рис.6

Значение индуктивности реакторов как при $f_{mod} = \text{const}$, так и при $f_{mod} = \text{var}$ зависит от частоты ШИМ, величину которой можно выбрать, руководствуясь одной из общепринятых инженерных методик. Одна из таких методик основана на требованиях ограничения динамических потерь при переключении транзисторов – динамические потери на переключение не должны превышать статических потерь в транзисторе. Исходя из сказанного, можно получить упрощенное расчетное соотношение для рекомендуемой частоты ШИМ, учитывающее это требование

$$f_{mod, rec} = \frac{I_c \cdot U_{CEsat}}{2 \cdot (E_{on} + E_{off})}. \quad (18)$$

Все величины, входящие в (18), являются справочными данными: I_c – номинальный коллекторный ток; U_{CEsat} – на-

пряжение насыщения коллекторно-эмиттерного перехода; E_{on} , E_{off} – соответственно энергия потерь при включении и выключении транзистора.

МЕТОДИКА ВЫБОРА ИНДУКТИВНОСТИ ФАЗНЫХ РЕАКТОРОВ

Изложенное выше, позволяет сформулировать основные положения методики выбора индуктивности реакторов АВИН, работающего как с постоянной, так и с переменной частотой ШИМ:

1. По известным значениям параметров силовой схемы АВИН из соотношения (10) определяем расчетное значение суммарной индуктивности $L_{\Sigma cp}$.

2. Строим зависимость (8) (см. рис. 5).

3. Учитывая предполагаемый режим работы АВ, из построенной зависимости определяем возможный диапазон изменения индуктивности $L_{\Sigma 1}$, полагая, что $\cos\varphi$ может понизиться на 0.5% от единичного значения.

4. Используя соотношению (18), задаемся частотой ШИМ f_{mod} .

5. Строим зависимость (14) (см. рис. 6).

6. По построенной зависимости, с учетом выбранного в п.3 диапазона изменения индуктивности $L_{\Sigma 1}$, производим окончательный выбор индуктивности реакторов, полагая, что величина ΔI_{S^*} не должна превышать 5% от I_{S1m} .

Рассмотрим пример. Для АВИН номинальной мощностью 11.2 kW, с параметрами $U_s = 220$ V, $k = 1.4$, $R_L = 50$ Ω , $R_{\Sigma} = 0.1$ Ω , необходимо выбрать индуктивность фазных реакторов. Выпрямительный мост АВ выполнен на транзисторно-диодном модуле SK35DGD12T4T с характеристиками транзисторов: $I_c = 35$ A, $U_{CE} = 1200$ V, $U_{CEsat} = 2.05$ V, $E_{on} = 3.27$ mJ, $E_{off} = 3.3$ mJ. Рекомендованное значение частоты модуляции по (18) $f_{mod.rec} = 5327$ Hz. В связи с тем, что расчетное значение коллекторного тока транзистора меньше номинального, ограничимся частотой $f_{mod} = 5$ kHz.

Расчетное значение суммарной индуктивности по (10) $L_{\Sigma 1p} = 5.09$ мН. Из рис.

5 возможный диапазон изменения индуктивности $L_{\Sigma 1^*} = 0.5...2$. Из рис. 6 диапазон изменения индуктивности $L_{\Sigma 2^*} = 2...5$, что полностью выходит за границы первого диапазона, за исключением приграничного значения 2. Поэтому целесообразным будет выбрать индуктивность реакторов несколько меньшей, что обеспечит необходимый запас по работоспособности схемы и незначительно скажется на увеличении амплитуды пульсации высокочастотной составляющей при $f_{mod}=\text{const}$ и незначительно увеличит частоту ШИМ по сравнению с выбранной при $f_{mod}=\text{var}$. Окончательно выбираем $L_{p^*} = 1.8$, что в пересчете на абсолютные единицы составит $L_p = 1.8 \cdot 5.09 \approx 9$ мН. Дальнейшее увеличение частоты модуляции повлияет на расширение запаса по работоспособности схемы и в этом случае можно выбрать меньшее значение индуктивности реакторов.

ВЛИЯНИЕ ТИПА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИНДУКТИВНОСТИ ФАЗНЫХ РЕАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АВ

Предложенная выше методика в равной степени подходит для АВИН как с гистерезисной системой управления [4], так и для АВ с постоянной частотой ШИМ [6]. Однако, изменение величины индуктивности реакторов по-разному сказывается на работу силовой схемы выпрямителя в зависимости от выбранной системы управления.

Из рис. 3 можно заключить, что принципиальным отличием одной системы управления от другой является разница в скорости прохождения электромагнитных процессов. Если при $f_{mod}=\text{const}$ скорость энергообмена между реактором, конденсатором и сетью при растущем положительном напряжении u_s замедляется ($S1>S2$, см. рис. 3,а), то при $f_{mod}=\text{var}$ скорость энергообмена растет ($S1<S2$, см. рис. 3,б), поэтому при $f_{mod}=\text{var}$ выходное напряжение будет ниже, чем при $f_{mod}=\text{const}$. Чем выше k при гистерезисной

системе управления, тем уже диапазон изменения частот [4]. Можно положить, что при возрастании k $f_{mod} \rightarrow f_{mod.cp} \cong const$, а частота ШИМ слабо зависит от k (см. рис. 7), что сужает ширину диапазона регулирования выходного напряжения.

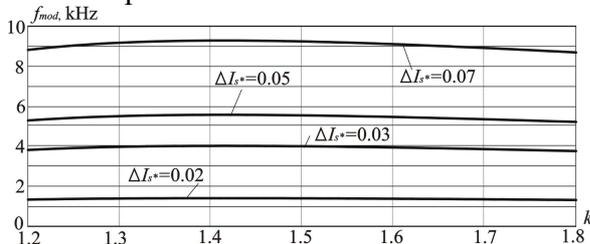


Рис. 7

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИН

Полученные в работе результаты были проверены на Matlab-модели АВ, способной работать как с постоянной, так и с переменной частотой ШИМ (рис. 8). Matlab-модель объединенной системы управления представлена на рис. 9. Математическая часть системы управления выполнена на основе р-q теории мощности [5]. Ключ K производит переключение с одной системы управления на другую. В блоках модели были заданы параметры, соответствующие проведенному ранее расчету. На рис. 10 представлены осциллограммы сетевых напряжения и тока (для фазы А) при завышенной индуктивности реакторов $L_p = 20$ мН, (рис. 10,а), расчетной индуктивности $L_p = 9$ мН (рис. 10,б) и заниженной индуктивности $L_p = 3$ мН (рис. 10,в). Осциллограммы иллюстрируют переход от системы управления $f_{mod}=const$ к системе управления $f_{mod}=var$ в момент времени $t=1$ с.

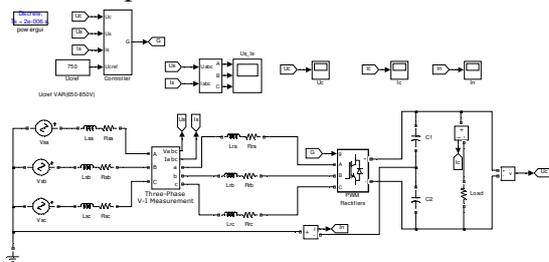


Рис. 8

По результатам экспериментов на Matlab-модели АВИН можно сделать следующие выводы:

- при $L_p = 9$ мН и $f_{mod}=const$ максимальное выходное напряжение $U_{0max} = 1045$ В ($k = 1.94$), а при $f_{mod}=var$ $U_{0max} = 980$ В ($k = 1.82$), что свидетельствует о более ограниченном диапазоне изменения выходного напряжения АВ с гистерезисной системой управления;

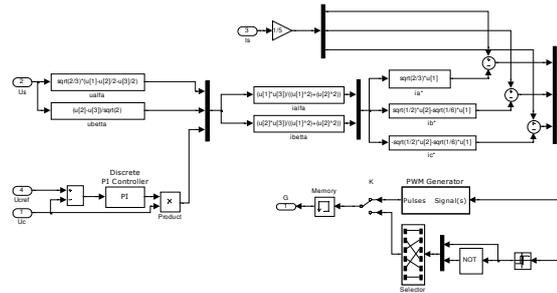


Рис. 9

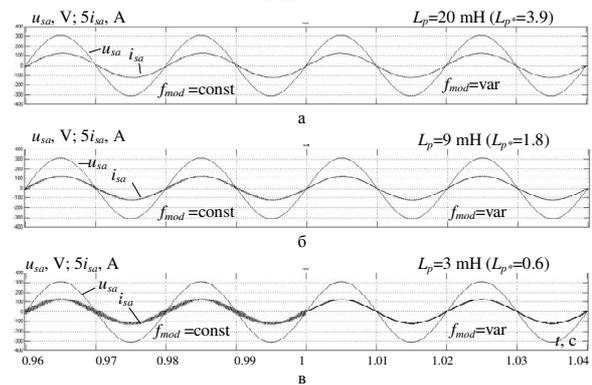


Рис. 10

- при увеличении L_p в АВИН с $f_{mod}=const$ появляется угол сдвига между сетевым напряжением и током, и схема АВ теряет свою работоспособность во всем диапазоне регулирования выходного напряжения;

- при увеличении L_p и $f_{mod}=var$ уменьшается частота переключения транзисторов, АВИН работает корректно во всем диапазоне изменения выходного напряжения ($k = 1.2-1.82$).

- при уменьшении L_p и $f_{mod}=const$ увеличивается величина максимального отклонения тока фазы от синусоидального тока задания ΔI_s во всем диапазоне регулирования выходного напряжения. Добиться предельного значения $\Delta I_{s*} = 0.05$ можно увеличив частоту ШИМ

(см. рис. 6). Диапазон изменения выходного напряжения ($k = 1.2-1.94$);

- при уменьшении L_p и $f_{mod} = \text{var}$ АВ работает корректно во всем диапазоне изменения выходного напряжения ($k=1.2-1.82$), однако, пропорционально увеличивается частота переключения транзисторов, что вызывает рост динамических потерь в полупроводниковых приборах и снижение КПД преобразователя.

ВЫВОДЫ

1. В каждой фазе активного выпрямителя – источника напряжения независимо от полярности протекающего тока в очередном проводящем состоянии находятся транзистор одной группы и диод другой группы. В связи с чем имеет место наложение двух электромагнитных процессов – высокочастотного и низкочастотного.

2. Разработана обобщенная методика выбора и алгоритм расчета индуктивности реакторов активного выпрямителя, учитывающие оба электромагнитных процесса в силовой схеме при постоянной и переменной частоте ШИМ.

3. Использование системы управления с постоянной частотой модуляции целесообразно в том случае, если требуется регулирование выходного напряжения в широком диапазоне ($k = 1.2-1.94$) при неизменной величине индуктивности реакторов.

4. В режиме работы с неглубоким узким диапазоном регулированием выходного напряжения или при $U_0 = \text{const}$ целесообразнее использовать систему управления гистерезисного типа.

5. В установках, где по каким-либо причинам индуктивность реакторов может изменяться в широком диапазоне, предпочтительнее использование АВ с гистерезисной системой управления.

6. В сложных динамических режимах работы выпрямителя возможно использование обеих систем управления, переключение между которыми осуществляется контроллером в зависимости от текущего состояния системы электроснабжения.

7. Создана Matlab-модель системы электроснабжения с АВИН и обобщенной системой управления, способной выдавать импульсы управления транзисторами как с постоянной, так и с переменной частотой ШИМ. Результаты компьютерного моделирования полностью подтверждают теоретические данные, изложенные в статье.

[1] P. Zanchetta, D. B. Gerry, V. G. Monopoli, J. C. Clare, and P.W.Wheeler, “Predictive current control for multilevel active rectifiers with reduced switching frequency,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 1, pp. 163–172, Jan. 2008.

[2] Jose R. Rodriguez, Juan W. Dixon, Jose R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezan. “PWM Regenerative rectifiers: state of art”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 1, pp. 5–22, 2005.

[3] Joaquín G. Norniella, José M. Cano, Gonzalo A. Orcajo, Carlos H. Rojas, Joaquín F. Pedrayes, Manés F. Cabanas, Manuel G. Melero “Analytic and Iterative Algorithms for Online Estimation of Coupling Inductance in Direct Power Control of Three-Phase Active Rectifiers”, IEEE, pp. 1–10, 2011.

[4] Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук. Автономный выпрямитель – источник напряжения с гистерезисной системой управления. Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Част. 2, Київ, 2011, сс. 75-82.

[5] H. Kim, F. Blaabjerg, B. Back-Jensen. “Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 5, pp. 701–710, 2002.

[6] Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук, Д.В. Тугай. Выбор индуктивности реакторов активного выпрямителя – источника напряжения, работающего с постоянной частотой ШИМ. Електротехніка і електромеханіка. – Х.: НТУ «ХП», 2011. - № 6. – С. 32-37.