

Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями

Пронин М. В., Воронцов А. Г.
ОАО “Силовые машины”, филиал “Электросила”

Аннотация. Рассмотрены возможности фильтрации напряжений и токов сети активными фильтрами в системах с тиристорными преобразователями производства филиала ОАО “Силовые машины” “Электросила”. Приведены данные экспериментальных исследований качества напряжения электросетей. Описаны алгоритмы работы активных фильтров. На основе моделирования систем сделан вывод о целесообразности применения активных фильтров.

Филиал ОАО “Силовые машины” “Электросила” осуществляет разработку и поставку высоковольтных тиристорных преобразователей частоты со звеном постоянного тока.

Из выполненных работ [1], [4] можно отметить поставку ПУ-1 (5 МВт) в качестве пускового устройства турбоагрегата ГТЭ-110 (110 МВт) на Ивановской ГРЭС. Комплект электрооборудования эксплуатируется более 3 лет.

Аналогичная поставка ПУ-6-08 (6 МВт, 6 кВ) выполнена на Опытно-промышленную станцию «Каборга» (Украина). Наладка комплекта оборудования выполнена в 2004 году.

На Тюменскую ТЭЦ-1 выполнена поставка пускового устройства ПУ-0 (2,5 МВт). На этой электростанции установлена газотурбинная установка V63 фирмы SIEMENS мощностью 63 МВт. Наладка системы выполнена в 2004 г.

Изготовлены и испытаны пусковые устройства ПУ-6-08 для Калининградской ТЭЦ. На этой электростанции установлены газотурбинные агрегаты V94.1 Ленинградского металлического завода, изготовленные по лицензии фирмы SIEMENS. Мощность турбоагрегатов 160 МВт.

На стенде «Электросилы» для пуска технологических синхронных машин в 2004 году установлено пусковое устройство ПУ-6-08. На 2005 год запланирована поставка тиристорного пускового устройства ПУ-10-08 (10 МВт, 10 кВ).

Для мельниц ММПС 50x84 и 70x70 разработаны приводы с синхронными двигателями ДСЗ-4000-6-40 (4 МВт, 6 кВ), тиристорными преобразователями частоты ПУ-6-08 и возбудителями ВТЕ-300-400. Два привода поставлены в ЗАО ЗДК “Полюс” на ГОК “Олимпиадинский” в 2002 г. Еще два комплекта будут поставлены в 2005 году.

В 2004 году выполнены поставки приводов вентиляторов главного проветривания рудника “Северный-Глубокий” комбината Печенга-Никель. На руднике применены вентиляторы ВЦД-42,5 (3700 кВт). В приводе вентилятора используются два синхронных двигателя СДН2-18-64-12 с возбудителями ВТЕ-300-400 и один 12-пульсный преобразователь частоты ТПЧ2-6-03 (4 МВт, 6 кВ).



Рис.1. Установка с двумя рудоразмельными мельницами на ГОК “Олимпиадинский”



Рис.2. Вентиляторы главного проветривания ВЦД-42,5 рудника “Северный-Глубокий”



Рис.3. Тиристорный 12-пульсный преобразователь частоты ТПЧ2-6-03 рудника “Северный-Глубокий”

Высоковольтные преобразователи частоты на однооперационных тиристорах дешевле преобразователей на полностью управляемых приборах. Благодаря этому сохраняются перспективы применения этих устройств. Однако этим устройствам свойственны недостатки. Наиболее существенным является искажение напряжений и токов сетей. В соответствии с ГОСТ13109-97 для сетей напряжением 6-20 кВ для коэффициента искажения синусоидальности напряжения существует нормально допустимый уровень 5 % и предельно допустимый уровень 8 %. На предельно допустимый уровень следует ориентироваться в устройствах, работающих кратковременно, на нормально допустимый уровень – в устройствах, работающих непрерывно.

Мощность указанных преобразователей обычно соизмерима с мощностью питающих сетей. В связи с этим коэффициент искажения синусоидальности напряжения сетей обычно велик и существует задача его уменьшения. Возможные решения этой задачи заключаются в увеличении индуктивностей токоограничивающих реакторов или трансформаторов на входе преобразователей, в увеличении мощности сетей при уменьшении их индуктивностей. Недостатки таких решений заключаются в малой эффективности и в увеличении стоимости установленного оборудования.

В большинстве случаев для уменьшения коэффициента искажения напряжений применяют индуктивно-емкостные резонансные фильтры. На каждую высшую гармоническую составляющую используется индивидуальный резонансный фильтр, например, на частоты 250 и 350 Гц. На составляющие более высокого порядка может быть использован резонансный фильтр на среднюю частоту для пары гармоник, например, фильтр на 1200 Гц для гармоник с частотами 1150 и 1250 Гц. С помощью резонансных фильтров можно подавить конкретные гармонические составляющие. В меньшей степени подавляются другие составляющие. Особенность резонансных фильтров заключается в том, что через них протекают гармонические составляющие токов не только конкретного преобразователя, но и всех других преобразователей, подключенных к данной энергосистеме.

В настоящее время развивается еще одно направление фильтрации напряжений сетей – применение активных фильтров [5]. Наиболее простым решением является применение в качестве активного фильтра транзисторного двухуровневого моста на модулях IGBT. Однако двухуровневый мост в режиме ШИМ формирует весьма искаженные напряжения со стороны сети. Для их эффективной фильтрации необходимо увеличивать частоту ШИМ. При этом возрастают динамические потери энергии. Более эффективно применение многоуровневых преобразователей. Эти преобразователи создают меньшие искажения напряжений сети на частотах ШИМ, в них меньше динамические потери энергии и переключения вентиляторов могут осуществляться на более высоких частотах.

Рассмотрим конкретную ситуацию – качество напряжения сети 6 кВ при питании 12-пульсного преобразователя ТПЧ2-6-03 привода вентилятора на руднике “Северный-Глубокий”, а также возможности применения активного фильтра для улучшения качества напряжения.

В феврале 2005 г. на руднике под руководством Л. А. Кучумова производилось обследование качества напряжения сетей представителями ООО “Энергосоюз”. Ниже приведены некоторые результаты измерений.

При работе вентилятора в установившихся режимах с частотами вращения 200, 250, 300, 350, 400 и 450 об/мин осуществлялась цифровая запись

токов и напряжений системы с шагом 50 мкс. Записывались три фазных напряжения сети 6 кВ и по два тока фаз каждого выпрямителя преобразователя ТПЧ2-6-03. При обработке результатов алгебраически определялись токи третьих фаз выпрямительных мостов. Путем пофазного суммирования токов мостов определялась трехфазная система токов сети 6 кВ. По фазным напряжениям и токам сети определялась мгновенная мощность привода.

При номинальной частоте вращения вентилятора измеренная мощность незначительно отличается от расчетной номинальной мощности привода. Зависимость мощности от частоты вращения соответствует “вентиляторной” нагрузке.

На рис.4. представлены трехфазные системы напряжений u_{s1} , u_{s2} , u_{s3} и токов i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} сети при работе вентилятора с номинальной частотой вращения 450 об/мин.

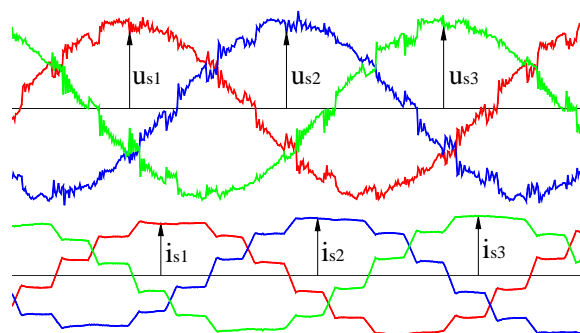


Рис.4. Напряжения и токи фаз сети 6 кВ при номинальной мощности преобразователя ТПЧ2-6-03

В измеренных напряжениях (рис.4.) присутствуют составляющие сравнительно высокой частоты, порядка 8-10 кГц. Они не регламентируются ГОСТ13109-97 и при оценке качества напряжения не учитываются. Однако они отрицательно влияют на работу некоторых устройств, например, счетчиков электроэнергии. В данном случае эти составляющие напряжений обусловлены резонансными явлениями в сети 6 кВ. RC-цепи преобразователя ТПЧ2-6-03 не участвуют в указанных колебаниях, так как имеют большие активные сопротивления (88 Ом в плече моста). Однако преобразователь ТПЧ2-6-03 оказывает возмущающее воздействие на сеть. Возможный путь борьбы с этими явлениями - применения дополнительных RC-цепей.

Если коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети 6 кВ определяется по ГОСТ13109-97 (с учетом составляющих до 2000 Гц), то для этого случая измеренная зависимость коэффициента искажения $K_{\text{и}}$ от частоты вращения вентилятора N представлена на рис.5. На этом же рисунке изображена расчетная зависимость, полученная на математической модели системы на этапе проектирования [4]. В соответствии с рис.5. вентилятор может длительно работать с частотами вращения до 50 % при соблюдении требований ГОСТ13109-97. При более высоких частотах необходима фильтрация напряжений сети 6 кВ.

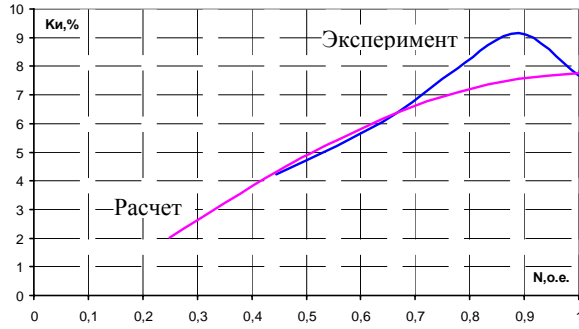


Рис.5. Экспериментальная и расчетная зависимости коэффициента искажения синусоидальности напряжения сети 6 кВ от частоты вращения вентилятора

Для оценки возможностей фильтрации напряжений и токов сети с помощью активного трехуровневого фильтра на рис.6. представлена схема, на которой изображены два мостовых выпрямителя

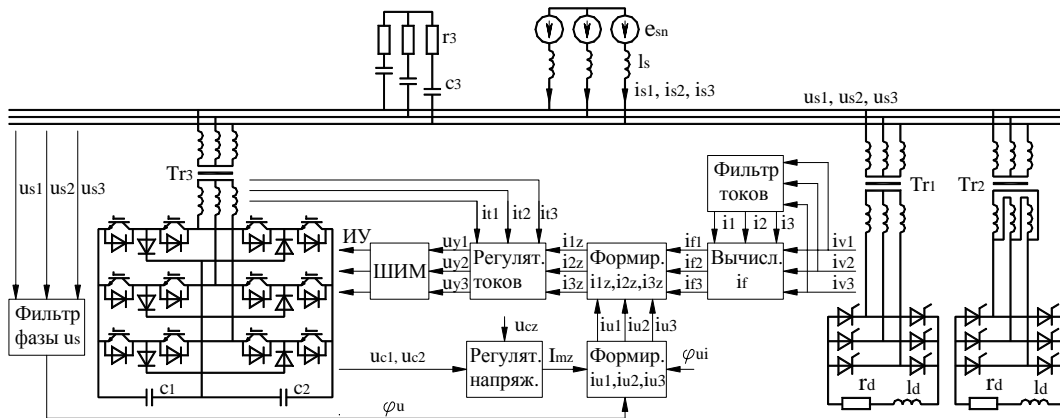


Рис.6. Схема с 12-пульсным тиристорным выпрямителем и трехуровневым транзисторным фильтром

Одна из задач транзисторного преобразователя – поддержание постоянного выпрямленного напряжения. Регулирование напряжения обеспечивается пропорционально-интегральным регулятором, на вход которого поступают сигналы по заданному выпрямленному напряжению u_{cz} и фактическим напряжениям u_{c1} и u_{c2} . На выходе формируется заданная амплитуда составляющих фазных токов транзисторного моста I_{mz} основной частоты.

Для определения синусоидальных составляющих токов фаз транзисторного моста фильтруются напряжения сети и вычисляется их фаза φ_u . Задаётся угол сдвига токов относительно напряжений φ_{ui} . Заданные синусоидальные составляющие токов:

$$\left. \begin{aligned} i_{u1} &= I_{mz} \sin(\varphi_u - \varphi_{ui}), \\ i_{u2} &= I_{mz} \sin(\varphi_u - \varphi_{ui} - 2\pi/3), \\ i_{u3} &= I_{mz} \sin(\varphi_u - \varphi_{ui} - 4\pi/3), \end{aligned} \right\} (1)$$

Для реализации функций активного фильтра осуществляется фильтрация токов i_{v1}, i_{v2}, i_{v3} , потребляемых из сети тиристорным 12-пульсным выпрямителем. При этом определяются трехфазная система синусоидальных составляющих фазных токов основной частоты i_1, i_2, i_3 , фаза токов φ_i , угловая частота токов ω_i , амплитуда токов I_{v1m} :

для 12-пульсного тиристорного преобразователя ТПЧ2-6-03, транзисторный фильтр и элементы системы управления фильтра (инверторы ТПЧ2-6-03 заменены пассивной нагрузкой, управление тиристорными мостами не рассматривается). В схеме сеть представлена фазными ЭДС e_{s1}, e_{s2}, e_{s3} и индуктивностями L_s . Фазы имеют напряжения u_{s1}, u_{s2}, u_{s3} и токи i_{s1}, i_{s2}, i_{s3} . Тиристорные мосты подключены к сети через трансформаторы Tr_1 и Tr_2 , в цепях выпрямленного тока мостов включены индуктивности L_d и сопротивления r_d . Транзисторный фильтр содержит емкости C_1 и C_2 и транзисторный трехуровневый мост, подключенный к сети через трансформатор Tr_3 . Для устранения высокочастотных пульсаций к сети подключена конденсаторная батарея с емкостью C_3 и активным сопротивлением r_3 в каждой фазе.

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= \varphi_i + \Delta t \cdot \omega_i, \\ \text{если } \varphi_i > 2\pi, \text{ то } \varphi_i &> \varphi_i - 2\pi, \\ e_1 &= \cos(\varphi_i), & e_2 &= \cos(\varphi_i - 2\pi/3), \\ e_3 &= \cos(\varphi_i - 4\pi/3), \\ A &= (e_1 \cdot i_{v1} + e_2 \cdot i_{v2} + e_3 \cdot i_{v3}) \cdot 2/3, \\ B &= (i_{v1}^2 + i_{v2}^2 + i_{v3}^2)/3, & C &= C + (B - C)\Delta t/T_i, \\ I_{v1m} &= \sqrt{2C}, \\ \text{если } I_{v1m} > 0, \text{ то } D &= A/I_{v1m}, \\ \omega_{ii} &= \omega_{ii} + \Delta t \cdot D \cdot K_{\omega i}, & \omega_i &= \omega_{ii} + D \cdot K_{\omega o}, \\ i_1 &= I_{v1m} \sin(\varphi_i), & i_2 &= I_{v1m} \sin(\varphi_i - 2\pi/3), \\ i_3 &= I_{v1m} \sin(\varphi_i - 4\pi/3), \end{aligned} \right\} (2)$$

где Δt – шаг работы системы управления, $e_1, e_2, e_3, A, B, C, D$ – промежуточные переменные, $K_{\omega i}, K_{\omega o}$ – коэффициенты обратных связей регулятора по интегралу отклонения частоты и по отклонению.

Не основные составляющие токов фаз тиристорного выпрямителя:

$$\left. \begin{aligned} i_{f1} &= i_{v1} - i_1, & i_{f2} &= i_{v2} - i_2, \\ i_{f3} &= i_{v3} - i_3. \end{aligned} \right\} (3)$$

Заданные токи фаз транзисторного моста:

$$\left. \begin{aligned} i_{z1} &= (i_{u1} + i_{f1})K_{mp}, & i_{z2} &= (i_{u2} + i_{f2})K_{mp}, \\ i_{z3} &= (i_{u3} + i_{f3})K_{mp}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где K_{mp} – коэффициент трансформации.

Напряжения управления транзисторами формируются пропорциональными регуляторами токов:

$$\left. \begin{aligned} u_{y1} &= (i_{z1} - i_{t1})K_i, & u_{y2} &= (i_{z2} - i_{t2})K_i, \\ u_{y3} &= (i_{z3} - i_{t3})K_i, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

K_i – коэффициент обратной связи по отклонению.

Импульсы управления транзисторами формируются в блоке ШИМ при сравнении пилообразных опорных напряжений $u_{оп1}$, $u_{оп2}$ с трехфазной системой напряжений управления u_{y1} , u_{y2} , u_{y3} .

В соответствии с указанным описанием разработана компьютерная модель установки рис.6. (методики разработки моделей описаны в [3], [4]).

Расчет электромагнитных процессов выполнен при следующих данных. Напряжение сети 6 кВ, частота 50 Гц, $L_c=1,1$ мГн, $C_3=3$ мкФ, $R_3=7$ Ом. Tr_1 и Tr_2 имеют мощность по 2,5 МВА, коэффициент трансформации 1, напряжение короткого замыкания 5,2 %. $L_d=40$ мГн, $r_d=28,16$ Ом. Мощность трансформатора Tr_3 550 кВА, напряжение короткого замыкания 5,5 %, коэффициент трансформации 15 (напряжение вторичной обмотки около 400 В). $C_1=C_2=0,03$ Ф, заданное выпрямленное напряжение 1400 В (по 700 В на каждой емкости). Частота ШИМ 8 кГц, дискретность работы системы управления 30 мкс. Мощность тиристорного 12-пульсного выпрямителя 4 МВт, номинальный выпрямленный ток мостов 266,5 А. Выпрямленные токи мостов поддерживаются индивидуальными регуляторами. Из-за неточностей датчиков и регуляторов токи могут различаться. В расчете заданные выпрямленные то-

ки равны 274,5 А и 258,5 А. Результаты представлены на рис.7 и 8. и в табл.1 и 2.

На рис.7. изображены: u_{sn} – напряжения фаз сети, i_{sn} – токи фаз сети, i_{vn} – токи трансформаторов Tr_1 и Tr_2 , i_{t1} – ток трансформатора Tr_3 , u_{d1} , u_{d2} – выпрямленные напряжения тиристорных мостов, i_{d1} , i_{d2} – выпрямленные токи тиристорных мостов. На рис.8. изображены: $u_{оп1}$, $u_{оп2}$ – опорные напряжения, u_{y1} – напряжение управления 1 фазы транзисторного моста, i_{1z} , i_{t1} – заданный и фактический токи фазы транзисторного моста.

Из табл.1 следует, что при заданном различии токов тиристорных мостов (порядка 6 %) углы управления вентилями различаются на 11 град. и нарушается 12-пульсный режим работы преобразователя – в токах и напряжениях сети присутствуют не только 11, 13, 23 и 25 гармонические составляющие, но также 5, 7, 17, 19 составляющие, характерные для 6-пульсных преобразователей. Если осуществлять фильтрацию напряжений сети резонансными фильтрами, то они необходимы на весь указанный ряд гармоник.

Активный фильтр подавляет гармонические составляющие не высокого порядка. После включения фильтрации (табл.2) в напряжениях сети уменьшились до незначительных величин 5, 7, 11 и 13 гармонические, 17 гармонические уменьшились в 4,3 раза, 19 – в 2,7 раза. Составляющие более высокого порядка уменьшились в меньшей степени или даже увеличились. В целом коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети уменьшился почти в 2 раза. Коэффициент искажения токов сети уменьшился в 4,5 раза.

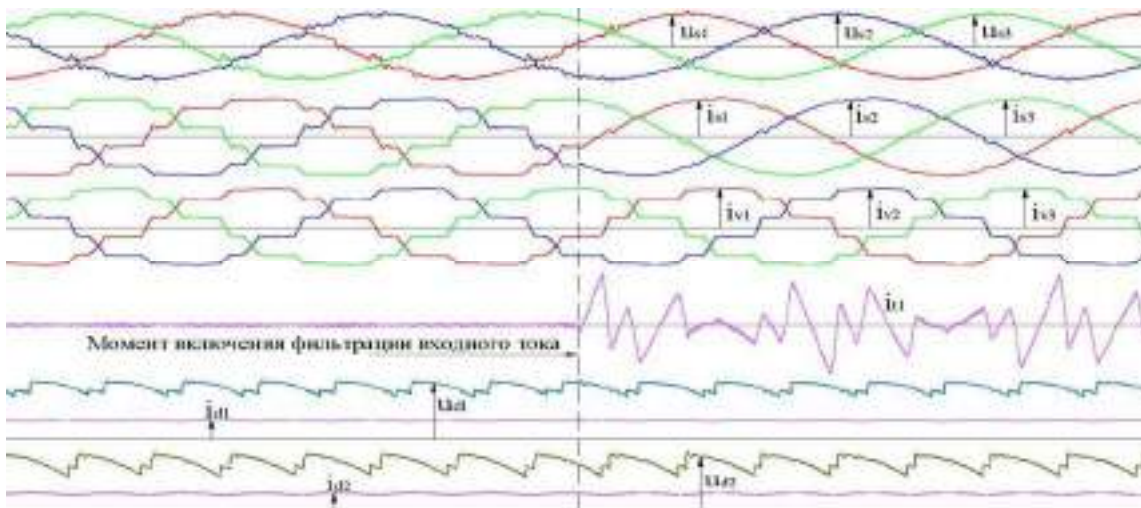


Рис.7. Напряжения и токи в схеме с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым транзисторным фильтром

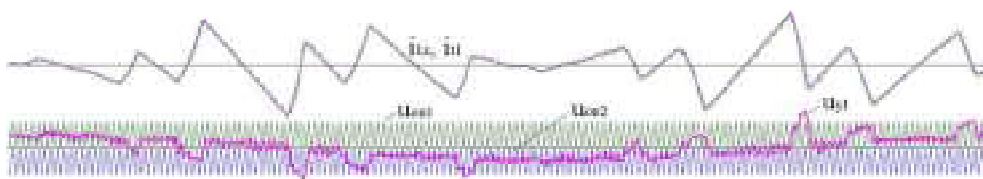


Рис.8. Напряжения и токи активного фильтра

Табл.1. Анализ системы до включения фильтра

Напряжение фазы сети, В			3470.614
Коэффициент искажения:			0.06795
Частоты, Гц	Действ. знач.	Фазы, гр.	
50	3462.590	-176.0955	
250	52.565	-88.4711	
350	54.022	-122.4761	
550	89.922	-103.7458	
650	64.099	-139.7246	
850	92.993	64.8294	
950	81.481	30.1785	
1450	49.187	178.8366	
1550	46.413	136.4935	
2050	40.840	-92.3262	
2150	32.100	-137.4508	
2350	42.643	-3.0213	
Ток фазы сети, А			415.547
Коэффициент искажения:			0.1263
Частоты, Гц	Действ. знач.	Фазы, гр.	
50	412.216	163.1872	
250	30.592	1.2442	
350	22.369	-32.6105	
550	23.635	-13.6605	
650	14.304	-49.7053	
850	15.816	154.8217	
950	12.404	120.0715	
Ток фазы трансформатора Тр3, А			3.131
Частоты, Гц	Действ. знач.	Фазы, гр.	
350	0.255	13.8385	
1300	0.574	135.4726	
1350	0.291	140.7758	
1400	0.340	-29.8291	
7900	1.627	-96.6372	
8100	1.623	-84.5749	
Выпрямленное напряжение Ud1, В			7737.409
Выпрямленное напряжение Ud2, В			7273.051
Выпрямленный ток Id1, А			274.768
Выпрямленный ток Id2, А			258.295
Угол управления 1 моста, гр.			14.304
Угол управления 2 моста, гр.			25.311
Ток конденсатора C1, А			29.615
Ток конденсатора C2, А			30.404
Напряжение конденсатора C1, В			698.228
Напряжение конденсатора C2, В			701.740

В табл.1 и 2 коэффициенты искажения напряжения сети определены с учетом бесконечного ряда высших гармонических. По ГОСТ13109-97 следует учитывать составляющие до 40 порядка. С учетом этого активный фильтр позволяет уменьшить коэффициент искажения напряжения сети до 2 % (табл.2). Улучшения качества напряжений достигаются установкой весьма мощного оборудования. Мощность трансформатора Тр3 составляет 11 % от суммарной мощности трансформаторов Тр1 и Тр2.

При рассмотренном алгоритме фильтрации токов сети фильтр подавляет высшие и низшие гармонические составляющие, а также неканонические составляющие, обусловленные работой того преобразователя, в котором измеряются токи. Искажения, вносимые в сеть другими потребителями, не контролируются.

Активный фильтр может быть использован также для компенсации реактивной мощности сети. Для реализации этой функции в формулах (1) изменяется заданный угол сдвига токов относительно напряжений.

Выводы

1. Предложен алгоритм управления активным фильтром напряжений сети, питающей полупроводниковый преобразователь. Особенность алгоритма заключается в компенсации тех искажений, которые обусловлены конкретным преобразователем.

Табл.2. Анализ системы после включения фильтра

Напряжение фазы сети, В			3463.745
Коэффициент искажения:			0.03635
Частоты, Гц	Действ. знач.	Фазы, гр.	
50	3461.456	94.0011	
850	21.485	33.2356	
950	30.373	-157.1768	
1250	17.261	-139.2795	
1450	28.706	154.2716	
1550	31.422	-45.2279	
1850	35.736	-36.1508	
2050	31.522	-132.4163	
2150	35.835	10.0739	
2350	31.708	-176.0092	
2450	38.282	-19.5320	
2950	24.147	-127.4797	
Ток фазы сети, А			413.401
Коэффициент искажения:			0.02818
Частоты, Гц	Действ. знач.	Фазы, гр.	
50	413.237	72.7154	
350	3.394	-156.6711	
550	3.579	161.5985	
650	3.210	-68.2459	
850	3.612	123.2865	
950	4.558	-66.9134	
1550	2.898	45.2155	
Ток фазы трансформатора Тр3, А			53.530
Частоты, Гц	Действ. знач.	Фазы, гр.	
250	27.322	89.0802	
350	26.493	-133.0570	
550	24.545	-116.2726	
650	14.425	25.5597	
850	16.198	-135.0046	
950	15.471	4.2229	
Выпрямленное напряжение Ud1, В			7703.658
Выпрямленное напряжение Ud2, В			7289.691
Выпрямленный ток Id1, А			273.579
Выпрямленный ток Id2, А			258.837
Угол управления 1 моста, гр.			13.053
Угол управления 2 моста, гр.			25.406
Ток конденсатора C1, А			461.139
Ток конденсатора C2, А			454.482
Напряжение конденсатора C1, В			697.104
Напряжение конденсатора C2, В			705.846

2. Реализация активного фильтра позволяет осуществлять комплектную поставку частотно-регулируемых приводов с высоковольтными тиристорными преобразователями и транзисторных фильтров и обеспечить соответствие систем требованиям стандартов по качеству напряжения.

3. Активный фильтр должен выполняться на сравнительно высокую частоту ШИМ (8 кГц и более) при сравнительно малом времени цикла работы системы управления (например, 30 мкс).

Литература

- [1] Дробкин Б. З., Карзунов Р. А., Крутяков Е. А. и др. Высоковольтные тиристорные преобразователи частоты ОАО «Электросила». Электротехника, №5, 2003.
- [2] Логинов А.Г., Фадеев А.В. Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО «Электросила». Электротехника, №9, 2001.
- [3] Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). ОАО «Электросила», СПб., 2003, 172 с.
- [4] Пронин М. В., Воронцов А. Г., Калачиков П. Н., Емельянов А. П. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение). Под редакцией Крутякова Е. А. СПб., «Силовые машины» «Электросила», 2004 г. 252 с.
- [5] Vuja G., Castellan S. Active filter for high-power medium-voltage diode rectifiers.//EPE-2003, Toulouse, Fr.