

Рис. 6. Полная схема для анализа взаимодействия стабилизированного УВ с питающей сетью

ленного тока и системы автоматического регулирования, определяемое нелинейной системой уравнений,

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\| \frac{\bar{E}(p)}{\bar{U}(p)} \right\| = \left\| Z_c(p) \right\| \left\| \frac{\bar{I}_0(p)}{\bar{I}(p)} \right\| ; \\ \left\| \frac{U_d(p)}{U_H(p)} \right\| = \left\| Z_\Phi(p) \right\| \left\| \frac{I_d(p)}{I_H(p)} \right\| ; \\ U_H(p) = Z_H(p) I_H(p); \\ |\bar{I}(t)| = I_d(t); \\ \operatorname{Re}[\bar{U}(t) \bar{I}^*(t)] = I_d(t) E_d(t); \\ U_d(t) + R_3 I_d(t) = E_d(t); \\ E_d(t) = |\bar{U}(t)| \cos \alpha(t); \\ \alpha(t) = \arccos x(t); \\ [U_3(p) - U_H(p)] G_p(p) = x(p). \end{array} \right. \quad (9)$$

Анализ и моделирование на ЭВМ показывают, что процессы, протекающие в результате взаимодействия системы автоматического регулирования УВ с его входной сетью питания, принципиально имеют неблагоприятный характер нелинейных слабо демпфированных колебаний, которые могут стать причиной дестабилизации системы в аварийных режимах. К этому следует добавить, что сложность математического описания всей системы в целом крайне затрудняет проектирование.

Одним из возможных путей улучшения электромагнитной совместимости стабилизированного выпрямителя с питающей сетью является поиск и реализация таких алгоритмов управления фильтрокомпенсирующими устройствами, которые ориентированы на стабилизацию модуля входного напряжения УВ. При этом полоса пропускания системы управления ФКУ должна перекрывать полосу частот системы автоматической стабилизации УВ.

## Список литературы

1. Электромагнитная совместимость стабилизированного выпрямителя с сетью и требования к динамике компенсирующих устройств / В. П. Шипило, Н. Д. Левицкая // Улучшение электромагнитной совместимости электрических полупроводниковых преобразователей как средство экономии материальных и энергетических ресурсов. М.: Информэлектро. 1987. С. 24.
2. Шипило В. П., Левицкая Н. Д. Взаимодействие стабилизированных полупроводниковых преобразователей с источником питания постоянного напряжения // Электротехника. 1989, № 7.

УДК 621.316.761.2::621.382.233.026

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБОРУДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА НА МОЛДАВСКОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ

О. П. НЕЧАЕВ, И. П. ТАРАТУТА, В. С. ЧУПРИКОВ, кандидаты техн. наук  
ВЭИ им. В. И. Ленина

С мая 1986 г. по настоящее время на Молдавском металлургическом заводе (ММЗ) работает статический тиристорный компенсатор СТК-160/138-35, обеспечивая компенсацию реактивной мощности нагрузки и стабилизацию напряжения на шинах печных трансформаторов. Схема СТК в однолинейном исполнении приведена на рисунке. Компенсатор включает в себя тиристорно-реакторную группу (ТРГ) мощностью 160 МВ·А и набор из восьми фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) мощностью 138 МВ·А, настроенных на 2, 3, 4, 5, 7, 11-ю гармоники. Коммутация ФКЦ осуществляется выключателями ВВЭ-35-20/1600. В линии СТК установлен выключатель ВВУ-35-40/3200. Для защиты от перенапряжений применены разрядники РМВ-35, установленные на шинах СТК и каждой ФКЦ. Подключение ФКЦ к шинам 35 кВ, а также связь между фильтровыми реакторами и конденсаторными батареями выполнена кабелями ААШВ-120 мм<sup>2</sup>: в фазах ФКЦ 2, 3, 4 и 5-й гармоник применены по два кабеля, в фазах 7 и 11-й гармоник — по одному.

Для определения соответствия расчетных и реальных воздействий на оборудование были проведены испытания ФКЦ при их различном сочетании и различных режимах работы печей на ММЗ. Для осциллографирования явлений использовались емкостные делители напряжения ( $C_2=0,02$  мкФ;  $C_1=220$  пФ), шунты сопротивлением (1—2) Ом во вторичных обмотках трансформаторов тока присоединений и осциллографы 60ЭМ-2 и Н-117. Табл. 1 иллюстрирует максимальное значение тока ФКЦ при ее включении и потенциал точки X фазы ФКЦ между реактором и конденсаторной батареей.

Из приведенных данных следует, что токи при включении ФКЦ-4 меньше допустимых значений и превы-



имеют место при работе обеих печей в режиме расплава. Для ФКЦ-4 токи в основном не превышают 625 А. В отдельных случаях всплески тока (отдельные импульсы) достигают 825 А (при допустимом пусковом токе 1900 А). В ФКЦ-3 токи имеют амплитуду около 560 А, отдельные импульсы тока достигают 900 А (при допустимом пусковом токе 1330 А). Для ФКЦ-2 амплитудные значения тока лежат в диапазоне 560—620 А. В отдельных случаях они достигают 745 А, что превышает допустимые значения на 17 %.

Существенное влияние на режим работы ФКЦ оказывают броски тока намагничивания при включении электропечного трансформатора (ЭПТ) в режиме холостого хода при другом неработающем. Броски тока ЭПТ по амплитуде достигают 6—7 кА и затухают с постоянной времени 0,3 с. Частота их появления — 10—15 раз в сутки. Электропечной трансформатор в режиме холостого хода является источником, генерирующим первую и четные гармоники; амплитуда второй гармоники составляет примерно 20 % амплитуды броска тока намагничивания и может достигать 1200—1400 А. С учетом основной гармоники максимальное значение тока в ФКЦ-2 составит 1600—1800 А, что в 2,5—3 раза превысит допустимый пусковой ток фильтра. Результаты измерений токов и напряжений ФКЦ-2 и ФКЦ-4 в режиме холостого хода ЭПТ приведены в табл. 3.

В приведенных опытах включены ТРГ и все ФКЦ, за исключением одной ФКЦ-3. При амплитудных значениях тока х. х. ЭПТ не более 2000 А перегрузки по току ФКЦ-2 и ФКЦ-4 не превосходят допустимых значений. В диапазоне амплитуд тока х. х. 2500—3500 А ток в ФКЦ-2 достигает значений 1300—1700 А, что недопустимо для обеспечения надежной работы ФКЦ-2. При амплитудных значениях тока х. х. ЭПТ свыше 3500 А имеют место сверхперегрузки ФКЦ-2 и ФКЦ-4, приводящие к отклонению их от защиты. В полученных результатах имеется несоответствие между ожидаемыми и реальными значениями тока ФКЦ-2. Так, в опыте 1 (табл. 3) ожидаемое значение должно бы равняться сумме амплитуд тока первой гармоники (около 400 А) и второй гармоники, составляющей 20 % амплитуды тока х. х. ( $0,2 \times 3720 = 750$ ), т. е. 1150 А. Реальное же значение (2780 А) в два с лишним раза превышает полученное. Это объясняется тем, что при токах ФКЦ-2 свыше 800 А происходит насыщение сердечника фильтрового реактора, его индуктивность падает с 87 до

20 мГц и частота настройки ФКЦ-2 увеличивается примерно вдвое. Так как при мощности к. з. питающей системы на шинах 35 кВ  $560 \div 600$  МВ·А и генерируемой мощности СТК 120—138 МВ·А имеет место резонанс тока в области частоты 100 Гц, то указанная расстройка ФКЦ-2 приводит к резонансным явлениям. В результате возникает недопустимая перегрузка ФКЦ-2. Кроме того, большой ток х. х. ЭПТ приводит к существенным искажениям формы напряжения на шинах 35 кВ, что, в свою очередь, ведет к асимметричному режиму работы ТРГ, которая также начинает генерировать вторую гармонику.

Для исключения недопустимых воздействий в режиме х. х. было принято решение ограничить броски тока намагничивания. Это достигается включением в цепь ЭПТ на время 1 с токоограничивающих резисторов сопротивлением 5 Ом. Установка резисторов в цепь включения ЭПТ, как показали опыты, обеспечивает уменьшение второго импульса тока х. х. в 2,9 раза, третьего — в 4,7, четвертого — в 10 раз по сравнению с амплитудой первого импульса. Максимальное значение тока х. х. в 30 проведенных опытах с резисторами составило 2,5 кА, что по крайней мере вдвое меньше максимальных значений амплитуды тока в опытах по включению ЭПТ без резисторов. Ток переходного процесса ФКЦ-2 не превышает допустимых значений и имеет малую длительность. Искажение сетевого напряжения незначительно. Введение резисторов позволяет ограничить воздействие не только на оборудование СТК, но и на электропечные и сетевые трансформаторы и автотрансформаторы 330 кВ.

Оперативное включение и отключение ФКЦ осуществляется модернизированными выключателями ВВЭ-35-20/1600. Этот выключатель в заводском исполнении не предназначен для коммутации емкостной нагрузки. При его испытании в режиме коммутации конденсаторной батареи наблюдались повторные зажигания и пробой межконтактного промежутка. Испытания выключателя при снятых шунтирующих резисторах и одновременности размыкания контактов не более 3 мс показали, что повторных зажиганий и пробоев не наблюдалось. Поэтому был принят следующий вариант выключателя ВВЭ-35-20/1600 для его применения при отключении ФКЦ СТК — выключатель с двумя дугогасительными камерами на полюс без шунтирующих резисторов с одновременной подачей напряжения на катушки отключения обеих камер. В таком исполнении были установлены восемь выключателей. Отключение токов к. з. возложено на выключатель ВВУ-35-40/3200 в линии СТК. С целью определения способности модернизированного выключателя осуществлять коммутацию ФКЦ проведено свыше 30 опытов по отключению ФКЦ с регистрацией напряжений и токов на полюсах. В большинстве случаев выключатель обрывал токи ФКЦ без повторных зажиганий и пробоев. При этом скачок восстанавливающегося напряжения между контактами находился в пределах  $(0,2—1,0) U_{\phi}$ , амплитуда восстанавливающегося напряжения (спустя 10 мс) достигала  $2,4 U_{\phi}$ . Напряжение на линии ФКЦ не превысило  $1,88 U_{\phi}$ , что практически в два раза меньше напряжения срабатывания разрядников РВМ-35. Имело место несколько случаев по-

Таблица 3

Максимальный ток х. х. ЭПТ, А	Максимальный ток ФКЦ-2, А, в период, с			Потенциал точки X в ФКЦ-2	Максимальный ток ФКЦ-4, А, в период, с		
	0,1	0,1 ÷ 0,2	1,0 ÷ 2,0		0,1	0,1 ÷ 0,2	1,0 ÷ 2,0
3720	2780	2245	820	4,9 $U_{\phi}$	1300	855	510
1000	780	490	420	1,8 $U_{\phi}$	625	570	510
1200	675	520	420	1,6 $U_{\phi}$	625	590	740
4800	2400	2100	1250	4,9 $U_{\phi}$	1150	870	540
2580	1350	740	490	2,3 $U_{\phi}$	660	540	570
3450	1725	675	455	2,4 $U_{\phi}$	855	700	500
3200	1540	740	430	3,0 $U_{\phi}$	920	625	465

Параметр, %	Номер ФКЦ					
	2	3	4	5	7	11
$I_v/I_1$	45	51	28	55	70	52
$U_1/U_{ном}$	133	112,5	107	104	102	101
$U_v/U_1$	28,6	19	7,9	11,9	11,2	8,8

вторных зажиганий выключателя. Осциллограммы напряжений на шинах 35 кВ и контактах выключателя при отключении ФКЦ-11 с последующим повторным зажиганием выключателя показывают, что после прохождения тока фазы В через нуль на контактах этой фазы относительно медленно начинается восстановление напряжения, которое спустя 5 мс становится равным  $U_\phi$ , и в этот момент происходит повторное зажигание выключателя этой фазы. После прохождения тока через нуль в фазе А напряжение между контактами этой фазы восстанавливается скачком до  $0,8 U_\phi$  и в дальнейшем достигает максимального значения  $2,5 U_\phi$ . Однако это не приводило к повторному пробое выключателя этой фазы. Амплитуда тока через две фазы ФКЦ при повторном зажигании достигла пятикратного значения номинального тока. Повторное зажигание приводит к повышению напряжения на линии ФКЦ на всех фазах (по отношению к земле) до  $1,6 U_\phi$ .

В силу вероятностного характера и малого числа повторных зажиганий выключателя выявить их какую-либо закономерность не удалось. Анализ полученных осциллограмм показал, что возможно повторное зажигание при напряжении между контактами выключателя, не превышающем  $1,25 U_\phi$ , и четкий обрыв токов, когда напряжение между контактами достигает значения  $2,7 U_\phi$ .

Аналогичные испытания были проведены и с выключателями ВВУ-35-40/3200. Испытания показали, что при напряжении сети (35—40,5) кВ выключатель отключает СТК при любых комбинациях подключенных ФКЦ без повторных зажиганий и пробоев. При этом напряжение на шинах 35 кВ СТК повышается до  $2,14 U_\phi$ , а при аварийных ситуациях — до  $2,63 U_\phi$ , что представляется опасным для электрооборудования.

Ошиновка ФКЦ, выполненная кабелями, подвергается более тяжелым воздействием по току и напряжению, чем в других цепях, подключенных к шинам 35 кВ. В полном токе ФКЦ существенную долю составляют высшие гармонические. Данные строки 2 табл. 4 иллюстрируют относительные величины гармонических составляющих тока, рассчитанные по номинальным характеристикам СТК. Во всех ФКЦ, за исключением ФКЦ-4, максимальная доля гармоник достигает 50%. Протекание этих токов может привести к дополнительному нагреву кабелей.

Изоляция кабелей ФКЦ, подключенных к шинам 35 кВ, в симметричных режимах находится под номинальным напряжением с коэффициентом несинусоидальности, не превышающим 5%, и рассчитана на эксплуатационные повышения напряжения согласно ГОСТ 1516.1-76. Другая картина имеет место для кабелей между фильтровыми реакторами и батареями. Их изоляция находится под повышенным напряжением промышленной частоты

$$U_1 = U_{ном} \frac{v^2}{v^2 - 1},$$

где  $v$  — относительная частота настройки ФКЦ;  $U_{ном}$  — напряжение на шинах 35 кВ СТК.

В строке 3 табл. 4 приведены относительные значения напряжения  $U_1$ . Напряжение в рассматриваемой

точке характеризуется существенной несинусоидальностью. Доля гармонических составляющих может быть определена по выражению

$$U_v = I_v X_{cv},$$

где  $X_{cv}$  — сопротивление батарей на частоте настройки.

Относительные величины  $U_v$  приведены в табл. 4. Длительное приложение повышенного несинусоидального напряжения может ухудшить характеристики изоляции кабелей и снизить срок их службы.

В соответствии с техническими условиями СТК должен обеспечить снижение колебаний напряжения на шинах с мощностью к.з. не менее 2000 МВ·А до уровня, регламентированного ГОСТ 13109-67, а также поддерживать значение  $\operatorname{tg} \phi$  на уровне не более 0,25 при 30-минутном максимуме реактивной мощности нагрузки не более 82 Мвар. Это значение максимума реактивной мощности соответствует проекту графику нагрузки, при котором циклы плавков дуговых сталеплавильных печей (ДСП) смещены относительно друг друга на половину длительности плавки (75 мин) и периоды расплава двух ДСП не совпадают. В этом случае при выбранной суммарной мощности ФКЦ 138 Мвар допускается потребление из сети 18 Мвар реактивной мощности. С целью исключения недопустимых воздействий в режиме х.х. ЭПТ длительная работа СТК производится с шестью включенными ФКЦ с суммарной мощностью 99 Мвар. Уставка регулятора СТК ( $Q_{уст}$ ) равна нулю. Чтобы получить в этих условиях реальную картину работы СТК с точки зрения снижения колебаний напряжения необходимо увеличить уставку регулятора до значения  $Q_{уст} = (138 \div 99) + 18 = 57$  Мвар.

Измерения колебаний напряжения на шинах 35 кВ производились с помощью разработанного в ВЭИ измерителя колебаний напряжения ИКН-1. Работа прибора основана на интегрировании входного напряжения в течение половины периода и последующей записи полученного значения динамическим запоминающим устройством. Выходной сигнал ИКН-1 записывался на шлейфовый осциллограф одновременно с сигналами токов нагрузки, ТРГ и суммарным током сетевых трансформаторов, а также мгновенным напряжением на шинах 35 кВ. Осциллограммы токов и напряжений в проектном режиме, когда одна печь находится в стадии начального расплавления, а другая — в стадии рафинирования, показывают, что при изменении уставки с 0 до 60 Мвар рабочая точка ТРГ смещается в середину регулировочной характеристики и происходят выравнивание токов сетевых трансформаторов и стабилизация напряжения шин 35 кВ. Максимальный размах колебаний напряжения снижается с 10 до 3%. С учетом мощности к.з. на шинах 35 кВ, равной 600 МВ·А, можно определить, что максимальный

размах колебаний в точке с мощностью к.з., равной 2000 МВ·А, не превысит 1%. В более спокойных режимах размах колебаний напряжения на шинах 35 кВ не превышал 1,5—2%. Таким образом, можно ожидать, что при полном наборе включенных ФКЦ и проектной уставке регулятора (18 Мвар) СТК обеспечит снижение колебаний и стабилизацию напряжения до требуемого уровня при проектном графике нагрузки.

Однако реальный график работы ДСП отличается от проектного. Работа печей ведется по принципу «плавка на плавку». При этом начала плавки сдвинуты всего на 10—15 мин, и режимы расплава двух ДСП совпадают в течение 20—25 мин. Вследствие этого увеличивается среднее значение суммарной реактивной мощности ДСП  $Q_{\text{нз}}$  до 100—110 Мвар. Из алгоритма работы регулятора СТК

$$Q_{\text{ст}}(t) = Q_{\text{ФКЦ}} - Q_{\text{нз}}(t) - Q_{\text{уст}}$$

следует, что при работе двух печей в режиме расплава и мощности ФКЦ 99 Мвар ТРГ будет полностью закрыта и, следовательно, не будет иметь место ограничение размаха колебаний напряжения.

Для оценки качества работы СТК в этом режиме необходимо проведение дополнительных исследований после введения в эксплуатацию всех восьми ФКЦ.

УДК 621.311.4.013

## ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. В. ШЕВЧЕНКО, доктор техн. наук, проф.,  
И. Г. БУРЕ, канд. техн. наук,

МЭИ

Система электроснабжения современного промышленного предприятия является сложным комплексом, включающим промышленные сети, преобразовательные устройства, приемники электрической энергии, а в ряде случаев и ее источники.

Общее количество единиц электрооборудования (двигателей, трансформаторов, выключателей, низковольтных аппаратов и реле, светильников, кабелей и проводов) на крупном предприятии (мощностью более 100 МВт) оценивается как  $10^5$  [1]. В системе электроснабжения промышленного предприятия (СЭСПП) четко прослеживается иерархичность ее структуры, выражающаяся в качественном отличии одного уровня СЭС от другого: первый уровень — отдельный приемник электрической энергии, второй уровень — сборка, шит 0,4 кВ; третий уровень — трансформатор 10/0,4 кВ; четвертый уровень — распределительная подстанция 10 кВ; пятый уровень — главная распределительная подстанция и шестой уровень — граница раздела предприятие — энергосистема [1].

Наличие в одной СЭС практически на всех уровнях, за исключением быть может шестого, приемников электрической энергии (ЭЭ), в которых происходит преобразование ЭЭ одного качественного уровня в другой, и которые различаются по мощности, а также по своей внутренней структуре, приводит часто к невозможности работы одних из-за неудовлетворительного качества электрической энергии, вызванного работой других. В этом случае говорят об электромагнитной несовместимости данных приемников ЭЭ.

При этом отклонение или соблюдение тех или других показателей качества электрической энергии (ПКЭ) на каком-либо уровне СЭС ПП не означает отклонения или соблюдения ГОСТ на другом уровне. Нормирование показателей качества электрической энергии (ПКЭ) отражено в ГОСТ 13109-87, который значительно ужесточает требования к ПКЭ по сравнению с действовавшими ранее по ГОСТ 13109-67 и ГОСТ 23875-79.

Особенно это касается несинусоидальности напряжения, оцениваемой коэффициентом несинусоидальности  $k_{\text{нсU}}$ . ГОСТ 13109-87 накладывает также ограничения на значения высших гармонических отдельных порядков, оцениваемых коэффициентом соответствующей гармонической составляющей  $k_{U(n)}$ . При этом введено различие между допустимыми значениями  $k_{\text{нсU}}$  и  $k_{U(n)}$  для разных уровней напряжения: до 1 кВ, 6—20 кВ, 35 кВ, 110 кВ и выше. Если ранее несинусоидальность напряжения рассматривалась, как источник дополнительных энергетических потерь, то теперь — это один из основных факторов, определяющих надежность работы электрооборудования.

Широкое внедрение в промышленность мощных потребителей ЭЭ с нелинейными вольт-амперными характеристиками: управляемых и неуправляемых преобразователей, электродуговых сталеплавильных печей, сварочных агрегатов и др. — приводит к значительному искажению синусоидальности напряжения в СЭС ПП. Вследствие этого возникают дополнительные перегревы токами высших гармоник основного электро-

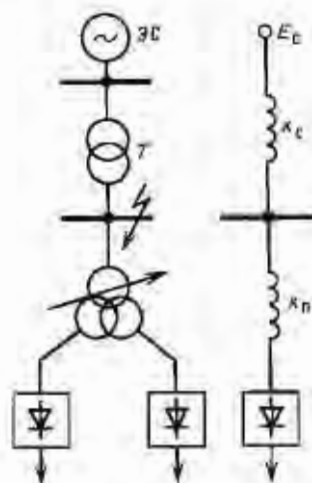


Рис. 1. Схема электроснабжения преобразовательного агрегата и ее схема замещения