

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ЦИКЛА ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА БУ-70 ПРИ РАБОТЕ С БУСТЕРОМ

С.Н.Васильев, Г.И.Гусев, О.А.Гусев, С.М.Максимов, С.В.Причин, В.Д.Федоров  
Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
им.Д.В.Ефремова, Ленинград  
В.П.Даньшин, А.И.Елисеенко, Н.С.Казьмина, В.Н.Корнилов, О.Н.Радин,  
Б.Л.Саркисов, В.Н.Драсов  
Институт физики высоких энергий, Серпухов

В системе питания кольцевого электромагнита протонного синхротрона БУ-70 в марте 1983г. введен в работу тиристорный преобразователь (ТП) на ток  $I_d = 5$  кА и напряжение  $U_d = 2 \times 10$  кВ [1]. Необходимость формирования дополнительной стабильной площадки поля в магнитном цикле для обеспечения совместной работы с бустером, запущенным в 1985г., потребовала ряда доработок как в системе управления преобразователем, так и в системе защиты. Успешному решению этой задачи способствовал накопленный уже опыт эксплуатации системы питания. Основные итоги его следует осветить подробнее.

Большое внимание при разработке системы питания и при эксплуатации уделялось вопросам защиты тиристорных преобразователей от перегрузки их по току и напряжению [2]. Это обусловлено характерными особенностями системы питания кольцевого электромагнита протонного синхротрона, а именно: значительной величиной запасаемой в электромагните энергии (120 МДж), наличием мощной разветвленной питающей сети четырех синхронных генераторов переменного тока типа ГСЗ 2036-8 с пиковой мощностью выше 100 МВА и средней мощностью потребления 28 МВт, параллельной работой четырех мостовых преобразователей в каждой из рассечек на общую нагрузку. Тиристорные модули блоков БВПМ-700/120, разработанные для ЛЭП постоянного тока и использованные в преобразователе системы питания кольцевого электромагнита БУ-70, характеризуются высокой конструктивной надежностью. За почти четырехлетний период эксплуатации при наработке выше 15000 ч в связи с отказом в модулях была заменена лишь одна тройка подобранных по характеристикам тиристоров из общего количества 2304 шт. Для защиты ТП, так же, как и в игнитронной системе питания, использовались элементы защиты электромашинных агрегатов, для снятия длительных перегрузок по току при внешнем и внутреннем коротком замыкании использовались быстродействующие автоматические выключатели прямого и обратного тока вентиляй моста. Основным же исполнительным органом защиты тиристорных преобразователей стал быстродействующий электродинамический короткозамыкатель с временем срабатывания до 150 мкс. Его срабатывание осуществлялось с задержкой на 12 мс относительно сигнала датчиков защиты, по которым обеспечивается мгновенное смещение импульсов управления тиристорами в инверторный режим. При этом ток перегрузки тиристоров переключается в цепь короткозамыкателя. Образование цепи короткого замыкания исключает также и развитие перенапряжений на выходе ТП за счет запасенной в нагрузке энергии при прерывании тока через тиристоры. Такой алгоритм действия системы защиты преобразователя вызывается датчиками напряжения, фиксирующими опрокидывание инвертора любого из параллельно работающих мостов преобразователя; датчиками, фиксирующими пере-

грузку любого моста по току выше  $21 \text{ A}$ ; датчиками перенапряжения на выходе преобразователя выше  $14 \text{ кВ}$ ; датчиками снижения напряжения более чем на  $15\%$ , а также датчиками защиты системы двигатель-генератор, ведущими к снятию напряжения питающей преобразователь сети [1]. Надежность работы этих устройств защиты обеспечивается наличием во всех цепях горячего резерва. Иногда происходили ложные срабатывания основного органа защиты ТП-быстродействующего электродинамического короткозамыкателя. Это было обусловлено использованием в нем искрового ртутного разрядника, находящегося под напряжением в продолжение длительных сеансов работы ускорителя. Замена разрядника на тиристорный ключ, работающий в режиме коротких импульсов с током, достигающим половины величины ударного тока тиристора, и сниженной за счет дросселя насыщения скорости нарастания тока в нем до допустимой величины позволило исключить ложные срабатывания при сохранении высокой надежности работы электродинамического короткозамыкателя.

Практически все случаи срабатывания защиты связаны со сбоями электроники в разветвленной сети управления тиристорами преобразователя. Сбой в управлении наиболее часто приводили к отключению системы питания при формировании в магнитном цикле бустерной площадки при переходных режимах к ней из-за существенной доли этих участков в общей продолжительности формируемого магнитного цикла, а также повышенной чувствительности управления системы питания к возмущениям и помехам в сильно зарегулированном режиме. Для сокращения числа отключений системы питания поэтому была введена блокировка срабатывания короткозамыкателя от опрокидывания инвертора при токах нагрузки ниже  $700 \text{ A}$ , где этот режим не опасен и возможно восстановление нормального режима работы после случайных сбоев. Надежная работа комплекта защиты позволила из года в год сокращать простоя из-за отказов системы питания, которые составили в 1983г. -  $1,4\%$ ; в 1984 -  $0,9\%$ ; в 1985 -  $0,7\%$ ; в 1986 -  $0,5\%$ . За этот период срабатывание защиты в 60% случаев возникающих аварийных ситуаций инициировалось сигналами опрокидывания инвертора, почти во всех остальных случаях срабатывание осуществлялось по сигналам токовой перегрузки отдельных мостов. Высокое быстродействие и чувствительность устройств защиты с быстродействующим короткозамыкателем позволили своевременно локализовать развитие аварий и практически исключили аварийные режимы, связанные с длительными токовыми перегрузками и срабатыванием ВАБов. Такая защита сохранится и при переводе системы на питание преобразователей непосредственно от сети без использования электромашинных агрегатов.

В период эксплуатации ТП проводились и работы по обеспечению более высокого качества регулирования магнитного поля за счет совершенствования системы его управления. Наиболее жесткие требования к качеству магнитного поля по уровню пульсаций и стабильности предъявляются на плате медленного вывода и бустерной площадке формируемого магнитного цикла. Существенными факторами, мешающими обеспечению низкого уровня пульсаций на площадках магнитного цикла, являются при этом изменение частоты питающей сети за цикл от 46 до 50 Гц, колебания фаз генераторов относительно друг друга до 4 эл.град., неравномерность загрузки генераторов по нагрузке, по возбуждению, возмущения по сети на разных фидерах питания двигателей электромашинных агрегатов. Все это в основном проявляется в повышении амплитуды неканонических гармонических составляющих пульсаций. Пробная опытная эксплуатация одноканальной асинхронной системы импульсно-фазового управления с пропорционально-интегральным законом регулирования показала, что при достаточной узкой полосе пропускания сигналов обратной связи и сигнала управления ( $f_\varphi < 20 \text{ Гц}$ ) уровень пульсаций напряжения

по сравнению с существующей системой фазового управления, работающей по мгновенным значениям напряжения, снижается более чем в два раза. Кроме того, система питания становится менее склонной к переходу в режим прерывистых токов. Она остается в работе с необходимым качеством формируемого поля при существенно большем уровне возмущений, связанных с разбалансом загрузки генераторов и двигателей из-за разницы напряжений фидеров питающей сети или управляющих сигналов. Особенно это заметно при формировании бустерной площадки. Не требуется постоянного контроля операторами режима работы электромашинных агрегатов и подстройки их параметров. С расширением полосы пропускания пульсаций возрастают и режим становится менее устойчивым. То же происходит и при подключении выходного сигнала контура по отклонению магнитного поля и расширении полосы пропускания его для повышения стабильности уровня магнитного поля на площадке. Это связано со значительным уровнем наводок и пульсаций в сигнале этого контура. Для повышения устойчивости работы системы питания необходимо повысить соотношение сигнал/помеха за счет увеличения амплитуды передаваемых по линиям связи сигналов или осуществления передачи сигналов в цифровом коде, а также оптимизировать полосу пропускания цепей обратной связи по напряжению и полю. Это стало ближайшей задачей проводимых работ перед последним в этом году сезоном работы ускорителя. В целом пробная опытная эксплуатация одноканальной асинхронной системы импульсно-фазового управления преобразователем с интегральной характеристикой в сравнении с асинхронной системой по мгновенным значениям выпрямленного напряжения на площадках и синхронной в выпрямительном и инверторном режимах показала, что она работает более устойчиво. На этой системе легче осуществляется перестройка режимов работы преобразователя, так как не требуется подстройки отдельных каналов управления из-за ухода их параметров и изменений выходных параметров электромашинных агрегатов, связанных с возмущениями по сети и по нагрузке. Для снижения этих возмущений планируется проведение работ по обеспечению стабилизации параметров электромашинных агрегатов за счет усиления коэффициентов обратных связей различных агрегатов, включения однотипных цепей в единую токовую цепь для выравнивания выходных характеристик параллельно работающих агрегатов. В случае недостаточности этих мер возможно разделение источников питания различных рассечек электромагнитов как по управлению, так и по силовым цепям. И это является еще одним шагом по подготовке системы питания к работе непосредственно от питающей сети 220 кВ. Основной же задачей при переходе на питание непосредственно от сети остается разработка преобразовательного трансформатора и снижение уровня возмущений от импульсной работы системы питания на сеть. Ближайшей же задачей повышения качества магнитного поля является ввод в действие разработанной системы авторегулирования и активного сглаживания пульсаций напряжения, обеспечивающей снижение размаха пульсаций на площадках поля до уровня 1 В.

#### Л и т е р а т у р а

1. С.Н.Васильев и др. В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, ОИЯИ, 1985, т. I, с. 377.
2. С.Н.Васильев и др. В сб.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, с. 123, Дубна, ОИЯИ, 1983.