

УДК 621.311

*Б.В. Ефимов, Н.М. Кузнецов, А.Е. Веселов,  
В.В. Ярошевич, Е.А. Токарева*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ**

Семинар № 22

---

**О**пыт эксплуатации систем электроснабжения (СЭ) с преобладанием двигательной нагрузки на горно-обогажительных комбинатах показывает недостаточную устойчивость нагрузки в аварийных и послеаварийных режимах. Использование схемных решений при проектировании СЭ, связанных со стремлением ограничить токи короткого замыкания (К.З.) до уровня безопасной работы коммутационной аппаратуры, таких как раздельная работа секций сборных шин, применение одиночных и групповых реакторов в цепях питания и на отходящих фидерах, приводит к недопустимо большим посадкам напряжения при нормальных пусках электродвигателей, невозможности осуществления режимов самозапуска, автоматически повторного включения и автоматического включения резерва.

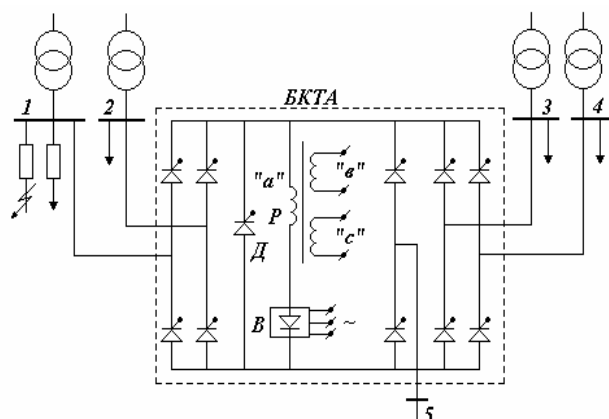
Разделение СЭ на многочисленные секции не позволяет рационально организовать питание потребителей для предотвращения нарушения технологического цикла при аварии на одной из секций сборных шин.

Одним из эффективных решений указанной проблемы является использование бесконтактных коммутирующих и токоограничивающих аппаратов (БКТА) [1-5]. Исследования работы БКТА и разработка новых аппаратов позволяют

предположить, что в ближайшие годы будут пересмотрены некоторые концепции радиального построения сетей в сторону объединения на параллельную работу через БКТА секций сборных шин одного напряжения понижающих трансформаторов на промышленных предприятиях. При этом в нормальном режиме мощность К.З. может быть на шинах 6 - 10 кВ более 1000 МВ·А и на шинах 0.4 кВ - до 100 МВА, что повышает качество электрической энергии без применения компенсирующих устройств и замены коммутационной аппаратуры.

Для использования в качестве шиносоединительных устройств наиболее подходят БКТА, имеющие в нормальных условиях независимое от частоты и практически равное нулю сопротивление и дополнительно совмещающие функции быстродействующего выключателя и регулятора тока. Этими свойствами обладают реакторно-тиристорные коммутирующие и токоограничивающие устройства [2-5].

На рис. 1. представлена схема фазы БКТА [2, 5], позволяющего объединить на параллельную работу четыре секции 1-4 сборных шин 6-10 кВ и дополнительно питать от секции 5 группу электроприемников, не терпящих даже незначительных понижений



**Рис. 1. Принципиальная схема БКТА на пять присоединений:** 1-4 - параллельная работа четырех секций; 5 - секция; P - трехфазный реактор; B - маломощный выпрямитель, питающийся от шин собственных нужд; Д - цепь реактор-выпрямитель, зашунтированный диодом

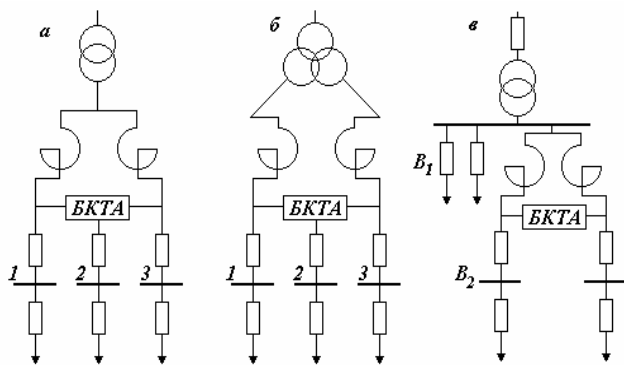
напряжения и перерывов питания. В состав схемы входят трехфазный реактор P и биполярные тиристорные группы, число которых равно числу соединяемых на параллельную работу секций. Аноды и катоды тиристоров соединены друг с другом и подключены к зажимам реактора. Последовательно с реактором включен маломощный выпрямитель B, питающийся от шин собственных нужд; цепь реактор - выпрямитель зашунтирована диодом Д.

В нормальном режиме в контуре реактор - выпрямитель - диод развивается постоянный ток, величина которого должна быть больше расчетной амплитуды переменного тока в любом из присоединений БКТА. Тогда диод Д будет непрерывно находиться в проводящем состоянии, закорачивая аноды и катоды тиристорных групп на присоединениях. При подаче на эти тиристоры импульсов управления одноименные фазы линий связи секций соединяются в звезду и резко уменьшается эквивалентное сопротивление цепи питания. Согласно анализу нормальных режимов номинальная проходная мощность присоединений БКТА не должна превышать 30 % от мощности трансформатора секции. При К.З. на одном из присоединений, например, на секции 1, под влиянием

резко возросшего напряжения на БКТА часть тиристоров запирается, и между аварийной и неповрежденными секциями включается реактор P, ограничивающий ударную полуволну тока К.З. от неповрежденных секций при целесообразных для применения реакторов на уровне, меньшем двойного значения номинального тока трансформатора секции.

При быстрой блокировке импульсов управления на тиристорах, присоединенных к поврежденной секции, ток подпитки прекращается за время порядка 0.01 с. На неаварийных секциях при этом нет понижения напряжения. Повторное включение с использованием БКТА и восстановлением параллельной работы всех секций может быть произведено немедленно после отключения аварийного фидера. При использовании БКТА легко реализуется принцип бесперебойного питания ответственных потребителей, не терпящих даже кратковременных перерывов электроснабжения. Такие потребители следует питать от шин, присоединенных к БКТА через отдельный бесконтактный коммутатор (шины 5 на рис. 1). Напряжение на этих шинах не изменяется при авариях или потере питания на трех из четырех секций сборных шин.

Однако в ЭС с преобладающей двигательной нагрузкой тока К.З. на от-



**Рис. 2. Варианты построения систем электроснабжения при использовании БКТА:** а - трансформатор со сдвоенным реактором; б - сдвоенный реактор с разъединенной средней точкой; в - выключатель  $B_1$  с присоединением мощных электроприемников,  $B_2$  - с присоединением большинства фидеров через сдвоенный реактор в сочетании с БКТА

дельных секциях могут достигать столь больших величин, что и при раздельной работе секций. Необходимо производить реактирование цепей питания или применять выключатели с повышенной коммутационной способностью. Для типовых случаев разработаны [3] схемы электроснабжения с включением в цепи питания сдвоенных реакторов и реакторов-трансформаторов с коэффициентом электромагнитной связи  $K_C$  между обмотками реакторов, близким к единице. Ветви таких реакторов в нормальном режиме соединяются через БКТА. На рис. 2 представлен ряд вариантов СЭ такого типа. Аналогично строятся и двухтрансформаторные схемы - следует применить БКТА с удвоенным числом присоединений к секциям.

В цепь трансформатора ввода (рис. 2, а) 6-10 кВ включен сдвоенный реактор, в котором при применении конструкции с чередующимися дисковыми катушками достигается  $K_C = 0.94-0.96$ . В нормальных и послеаварийных режимах ветви реактора закорочены через БКТА, и его эквивалентное индуктивное сопротивление равно:

$$X_{\Sigma} = (1 - K_C) / 2X_p,$$

где  $X_p$  -сопротивление плеча реактора, оказывается даже при  $X_p = 12\%$  не большим 0.3 %, т.е. реактирование цепи

питания практически отсутствует. При к.з на одной из секций имеем эффект глубокого ограничения тока, так как после отключения БКТА в цепь питания вводится индуктивное сопротивление плеча реактора. Бесконтактное АПВ после отключения аварии вновь восстанавливает параллельную работу секций подстанции, что существенно облегчает условия самозапуска нагрузки.

Включение БКТА непосредственно на зажимы ветвей реактора (рис. 2) устраняет дополнительное реактирование со стороны питания при отключениях выключателем секций 1 или 3. Секции 2 является секцией надежного питания.

При использовании в СЭ трансформаторов с расщепленными обмотками целесообразно применять сдвоенные реакторы с разъединенной средней точкой (реакторы-трансформаторы) - рис. 2, б.

Находят применение и схемы СЭ, построенные по типу рис. 2, в, где часть мощных электроприемников присоединяется к сборным шинам понизительного трансформатора через выключатели  $B_1$ , а большинство фидеров нагрузки питается от секций шин через токоограничивающую схему на базе сдвоенного реактора в сочетании с БКТА. Выключатели  $B_2$  могут быть выбраны более дешевыми и малогабаритными, в то же время качество электрической энергии

на шинах всех электроприемников будет одинаково высоким.

Для анализа режимов работы СЭ с двигательной нагрузкой при использовании БКТА выполнены расчеты переходных процессов в схемах рис.2 по методике [6], согласно которой в составе нагрузки секций учитываются по уравнениям Парка-Горева синхронные и асинхронные двигатели с полным воспроизведением зависимости момента сопротивления механизмов от скорости и работы систем возбуждения и автоматки ресинхронизации синхронных двигателей. Расчеты были ориентированы на исследования СЭ горнообогатительных комбинатов (ГОК), где в схемах распределительных сетей в цепях трансформаторов обычно включены реакторы, имеющие  $X_p = 12 \%$ , а секции сборных шин питаются раздельно. При тяжелых авариях (К.З. на секции, перерыв питания секции, потеря питания трансформатора) самозапуск затягивается до десяти секунд и более и в большинстве случаев является неуспешным, что влечет за собой нарушение технологического цикла производства. При пусках мощных двигателей возникают посадки напряжения на 20-25%. Замена реакторов в цепях трансформаторных вводов на двоянные реакторы с  $K_C$ , близким к единице, с объединением секций сборных шин на параллельную работу через БКТА позволяет существенно облегчить процесс самозапуска двигательной нагрузки, сократив его длительность в 2-3 раза. При пусках электродвигателей в нормальном режиме величины провалов напряжения не превышают 5-10 %, при этом в аварийных и послеаварийных режимах величины токов, протекающих через БКТА с проходной мощностью порядка 30 % от номинальной мощности секции, не превышают допустимых то-

ков по перегрузочной способности для тиристорных БКТА.

В настоящее время выполнены все необходимые исследования для расчета параметров силовых элементов БКТА, их систем управления, защиты и контроля, доказана высокая надежность БКТА. Проведены натурные испытания макета БКТА на напряжение 6 кВ, составлены технические требования к БКТА на напряжения 6 - 10 кВ с номинальной проходной мощностью 5-15 МВ·А и на напряжение 0.4 кВ с проходной мощностью до 2 МВ·А. Например, БКТА (рис. 1) на 4 присоединения с номинальными параметрами:  $S_H = 11 \text{ МВ·А}$ ,  $V_H = 10 \text{ кВ}$  имеет габаритные размеры трех шкафов КРУ 2-10, потери активной мощности -

Расчеты двоянных реакторов и реакторов-трансформаторов, имеющих большой коэффициент  $K_C$ , показали, что их индуктивные сопротивления, габаритные размеры и потери мощности не должны превышать ана-логичные параметры существующих конструкций двоянных реакторов, выполняемых с  $X_p \leq 12 \%$  и  $K_C \approx 0.5$ . Включение в трансформаторные вводы реакторов с  $X_p = 12 \%$  (рис. 2) вполне достаточно для получения токов к.з. на уровне 10-20 кА в СЭ с преобладающей двигательной нагрузкой и понизительными трансформаторами мощностью 63-80 МВА [3].

Исследования технико-экономических показателей предложенных СЭ [7] показывают, что благодаря решению проблем повышения качества и надежности электроснабжения как при реконструкции, так и при проектировании СЭ может быть достигнута значительная экономическая эффективность на подстанции мощностью порядка 10 МВт.

Из изложенного можно сделать следующие выводы.

В настоящее время на промышленных предприятиях возможно создание систем электроснабжения с параллельной работой на предприятиях секций сборных шин однотипных трансформаторов для получения высокого уровня качества электроэнергии при сохранении или даже ограничении токов К.З. на уровне, соответствующем подпитке точ-

ки К.З. только от одного трансформатора и двигателей нагрузки аварийной секции.

Системы электроснабжения, обладающие указанными свойствами, могут быть реализованы на базе бесконтактных коммутирующих и токоограничивающих аппаратов и при включении в цепи питания сдвоенных реакторов с большим коэффициентом электромагнитной связи между обмотками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг В.А. Тиристорный выключатель в системе электроснабжения промышленных предприятий. - В кн.: Опыт проектирования и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергия. 1972.

2. Кучумов Л.А., Латышко В.Д. Устройство для коммутации и регулирования переменного тока. Авт. свид. № 353349, БИОТЗ, № 28, 1970.

3. Кучумов Л.А., Утегулов Н.И. Применение в распределительных электрических сетях сдвоенных реакторов в сочетании с токоограничивающими устройствами. "Электричество", № 12, 1976.

4. Кучумов Л.А. О путях преодоления противоречивых требований повышения качества электроэнергии и уменьшения уровней токов

короткого замыкания. "Проблемы технической электродинамики", № 64, с. 61-63, 1977.

5. Кучумов Л.А., Утегулов Н.И. Система для электроснабжения потребителей переменным током. Авт. свид. № 600659. БИОТЗ. 1978. № 12.

6. Меркурьев Г.В., Черновец А.К., Шергин Ю.М. Переходные процессы в системах надежного питания АЭС при наличии синхронных электродвигателей. "Электричество", № 9, 1977.

7. Веселов А.Е., Воронкин А.Ф. и др. Технико-экономические вопросы применения токоограничивающих устройств в электрических сетях промышленных предприятий. - В сб.: Экономика энергоресурсов и оптимизация режимов электропотребления на предприятиях цветной металлургии, М., 1977. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Ефимов Б.В. – доктор технических наук, директор;

Веселов А.Е. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

Токарева Е.А. – младший научный сотрудник;

Ярошевич В.В. – младший научный сотрудник.

Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского Научного Центра Российской Академии Наук.

Кузнецов Н.М. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 22 симпозиума «Неделя горняка-2007».

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.В. Ляхомский.