

Самая крепкая связь

Интерфейс между вспомогательной электростанцией и алюминиевым заводом для повышения эффективности выработки электроэнергии

Макс Вайстнер, Георг Кёппель

Поскольку при производстве алюминия требуется огромное количество электроэнергии, необходимой для процесса электролиза, алюминиевые заводы имеют смысл строить там, где электрическая энергия доступна по разумной цене. Такие заводы являются привлекательными клиентами для энергоснабжающих компаний, так как они обеспечивают стабильные чистые нагрузки. Однако с ростом потребности в энергии ее производители приходят к убеждению, что питать современные алюминиевые заводы от общей энергосети нецелесообразно и, следовательно, необходима когенерация. Это значит, что сейчас вблизи от алюминиевых заводов строятся вспомогательные электростанции, специально предназначенные для их снабжения необходимой электроэнергией. Но что если завод расположен в отдаленной местности, где общая энергосеть слаба или вообще отсутствует? Поиск способов успешного сопряжения электростанции с алюминиевым заводом стал до некоторой степени проблемой. Ключ к нахождению наиболее оптимального технического решения для этого интерфейса связан с удовлетворением требований и к станции, и к заводу. Многие из этих аспектов рассмотрены в данной статье.

Потребляемая мощность электролизного цеха алюминиевого завода сейчас достигает 600 МВт, поэтому энергосистемам общего пользования все труднее удовлетворить требования к сети со стороны большого числа алюминиевых заводов. Для многих заводов эта проблема решается строительством вспомогательной электростанции. Однако новые проекты алюминиевых заводов, с вспомогательными электростанциями или без них, часто реализуются в местах со слабой сетью энергоснабжения, вследствие чего правильное согласование по мощности алюминиевого завода и электростанции является очень трудной задачей. Необходимо принять во внимание многие факторы, такие как потребление электроэнергии и колебания напряжения, качество электроэнергии, пусковые характеристики и характеристики отключения электролизной линии. К другим критическим факторам относятся эффективность электростанции во время нормального функционирования или последствия отключений энергоблока, когда она находится в режиме автономной работы. Кроме того, важно отметить, что сброс нагрузки с диодным выпрямителем происходит с максимальной скоростью 5 МВт за 3 с.

Проблема взаимодействия с энергосистемами для многих заводов решается строительством вспомогательной электростанции.

Удовлетворение требований, как со стороны алюминиевого завода, так и со стороны электростанции (см. вставку), является ключом к нахождению наиболее оптимального решения для интерфейса, который необходимо разработать на самой ранней стадии проекта. В итоге ранняя оптимизация проекта может понизить размер капиталовложений в электростанцию и подстанцию завода.



Требования к электростанции и алюминиевому заводу

Приведенный ниже список освещает вопросы сопряжения, которые должна решать электростанция, если предполагается согласовать ее работу с подстанцией алюминиевого завода. В частности, необходимо определить следующие параметры:

- устойчивость к короткому замыканию (SCC) для всех условий эксплуатации электростанции;
- максимально допустимые суммарные нелинейные искажения (THD);
- максимальные возможные качания мощности и номинальная мощность (в мегаваттах);
- максимальное качание реактивной/активной мощности;
- максимальная допустимая нагрузка кабелей по току гармоник;
- необходимый коэффициент мощности;
- максимальный небаланс мощности (абсолютное значение для каждой фазы).

Другие моменты, которые необходимо рассмотреть для электростанции, перечислены ниже.

- Должно допускаться понижение напряжения.
- Должны соблюдаться правила эксплуатации электроустановок.
- Компенсация тока гармоники второго порядка при подаче напряжения на большие трансформаторы.
- Должны быть указаны методика синхронизации генератора и минимальная нагрузка на блок.
- Колебания в сети и короткое замыкание при автономной работе допустимы на шине подстанции высокого напряжения алюминиевого завода.

Электростанция должна быть способна справиться со следующими особенностями нагрузки.

- Качания мощности: в течение суток поляризация в электролите создает пиковое качание мощности до 15 МВт.
- Электролизеры могут выключаться больше 5 раз за первый год (вызывая мгновенное падение нагрузки 600 МВт).
- При начальном вводе в эксплуатацию электролизеров, потребность в мощности возрастает на 3,5 МВт в сутки.
- Линейное нарастание мощности со скоростью 20 МВт/мин – предпочтительная скорость повторного пуска электролизера после выключения.
- Кратковременно в течение повторного пуска необходим коэффициент мощности, равный 0,82.
- Когда на трансформаторы со встроенным выпрямителем подается напряжение без синхронизации с выключателями питающих линий, провал напряжения на шине электролизера составит до 70%.
- Чем выше устойчивость к короткому замыканию, тем проще удовлетворить требования к качеству электропитания.
- Если максимально допустимые суммарные нелинейные искажения равны 2%, а устойчивость к короткому замыканию менее чем в 10 раз превышает номинальную мощность электролизеров, то на заводской подстанции необходимо установить фильтры в третичных обмотках трансформаторов.

При проектировании системы в целом должны приниматься во внимание следующие параметры

алюминиевого завода/электростанции:

- Нужна ли автономная работа? Если да, то необходимо подробно изучить имеющуюся информацию о передаваемой мощности, качестве электропитания и устойчивости к переходным процессам.
- Трансформаторы с диодными выпрямителями способны сбрасывать свою нагрузку с максимальной скоростью 5 МВт за 3 с.
- Синхронизированное включение и отключение трансформаторов уменьшает колебания мощности и провалы напряжения, а также механические напряжения на трансформаторах, выпрямителях и фильтрах гармоник. В любом случае автономный режим работы может быть невозможен без синхронизации.
- Элегазовые и воздушные выключатели должны обеспечивать неодновременность коммутации полюсов не хуже ± 1 мс.
- Чтобы соответствовать международному стандарту IEEE 519²⁾, для работы в автономном режиме трансформаторам с выпрямителями требуются фильтры в третичной обмотке.
- Возможно, следует установить фильтры гармоник на стороне высокого напряжения, поскольку гармоники могут проникать из сети.
- Необходимо, чтобы система управления электростанцией могла оперативно подавать сигнал сброса нагрузки.

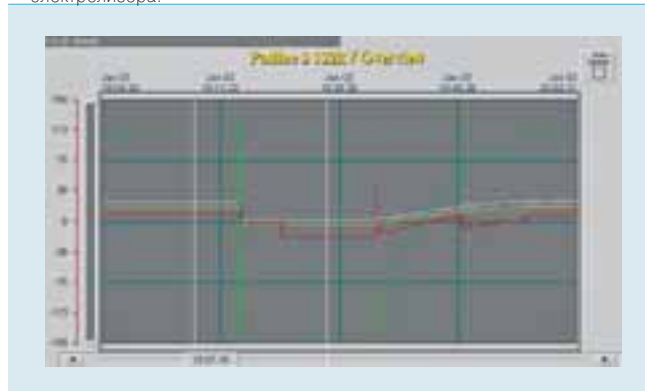
²⁾ IEEE 519 – это международный стандарт, который регламентирует допустимые уровни гармоник в электрических системах.

Разработка компании АББ, известная как Blackout Protection Control (BPC)¹⁾, также играет определяющую роль в обеспечении устойчивой работы алюминиевого завода.

На рис. 1 показаны типовые кривые напряжения в сети алюминиевого завода и нагрузки по току, как они видны со стороны электростанции, которые следует учитывать при проектировании системы в целом. На рис. 2 показана нагрузка, которую может сбросить подстанция алюминиевого завода при наличии системы ВРС компании АББ и без нее. Рис. 3 показывает зависимость качества электропитания, обеспечиваемого подстанцией алюминиевого завода, от перегрузочной способности питающей сети. Качество питания следует принимать во внимание в случае возможного отключения от сети и продолжения работы в автономном режиме. Некоторые потребители большой мощности на алюминиевом заводе, такие как источник бесперебойного питания

(UPS), инверторные преобразователи и приводы переменного тока, очень чувствительны к токам гармоник высокого порядка. На рис. 4 показан коэффициент мощности алюминиевого завода во время первоначального ввода в действие. Такой же коэффициент мощности получается после повторного пуска электролизеров. Схему выпрямителя необходимо выбирать, базируясь на согласовании источника питания, а также на качестве электроэнергии во время таких операций.

1 Потребность в активной мощности во время выключения и пуска электролизера.



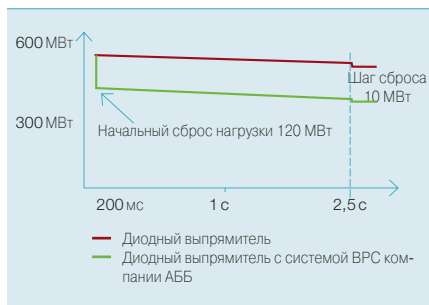
Падение напряжения во время подачи питания на трансформаторы с выпрямителями

В рамках системы «вспомогательная электростанция – алюминиевый завод» возможны некоторые рабочие сценарии, при которых электростанция питает алюминиевый завод в автономном режиме. При таких сценариях устойчивость к короткому замыканию может существенно снижаться. Поскольку трансформаторы с выпрямителями для новых крупных алюминиевых заводов становятся еще больше, то их воздействие на сеть во время подачи питания, в свою очередь, довольно значительно. Рис. 6 показывает это влияние при наличии управляемой подачи напряжения и без нее. Провалы напряжения могут привести к отключению уже запитанных грузов, что весьма критично для про-

¹⁾ Система ВРС компании АББ запатентована, доступ к информации о ней будет открыт позднее.

Исследования и разработки

2 Возможности сброса нагрузки подстанции алюминиевого завода при наличии системы ВРС компании АББ и без нее.



ектов алюминиевых заводов с вспомогательными электростанциями. Если говорить более конкретно, среднее значение напряжения может упасть на величину до 25% от номинального значения, то есть выйдет за допустимый предел 10%.

Приведенные ниже описания пяти примеров с вспомогательными и частично вспомогательными электростанциями для алюминиевых заводов иллюстрируют большое разнообразие построения и сложности систем в целом. Для этих проектов компания АББ либо поставляла оборудование, либо проводила системные исследования.

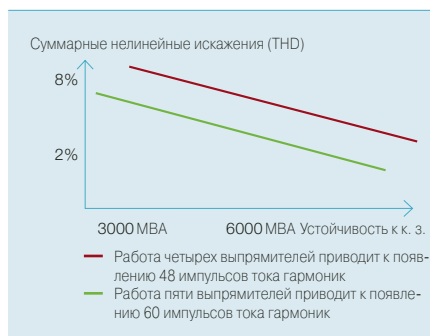
ALBA, Бахрейн

За последние годы на заводе Aluminum Bahrain (ALBA) произошло несколько полных отключений, которые были обусловлены целым рядом причин. Благодаря комбинированной генерации для пяти электролизеров, выключение питания и повторная его подача на электролизеры не особенно критичны, поскольку снижение нагрузки при этом меньше и может быть разделено между большим числом генераторов. Следовательно, режим работы ALBA таков, что не основные потребители алюминиевого завода и электролизеры работают от разных сетей и, таким образом, система в целом делается устойчивой к провалам напряжения и снижениям нагрузки.

DUBAL, Дубай

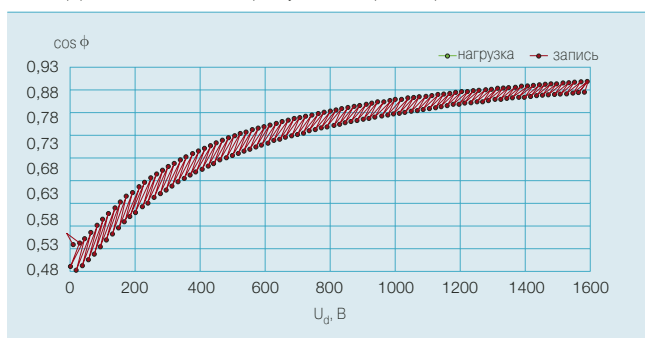
Предприятие Dubai Aluminum (DUBAL) обладает большим числом электролизеров. Их номинальная мощность не превышает 100 МВт, а питание осуществляется от нескольких надежных источников. Следовательно, сеть может с легкостью компенсировать возможное от-

3 Качество электропитания в зависимости от перегрузочной способности сети.

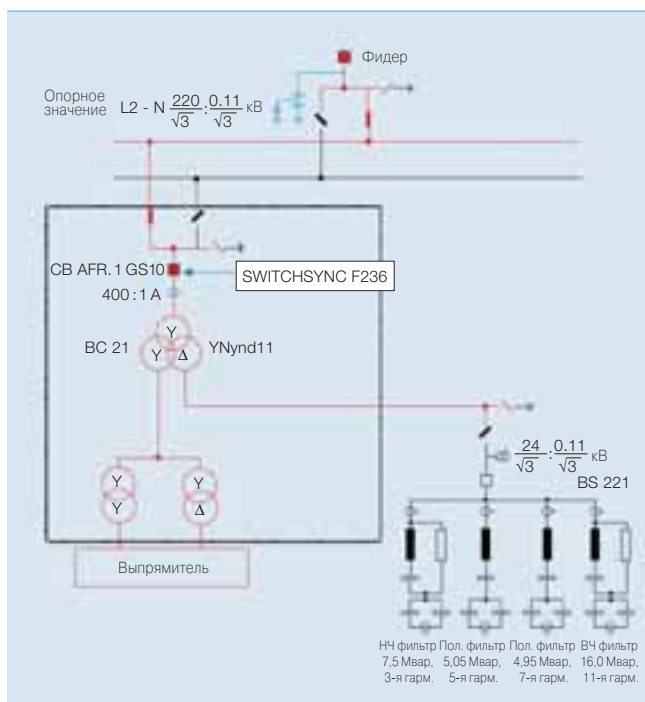


ключение одного из электролизеров. Кроме того, большое число электролизеров, а также их низкая номинальная мощность облегчают требования к уровню качества электроэнергии, поскольку токи гармоник компенсируются с помощью работы в многофазном режиме. Потребность в пусковой

4 Коэффициент мощности при пуске электролизера



5 Синхронизация коммутации на электростанции в Нордурале (Исландия)



мощности и сброс нагрузки здесь не вызывают беспокойства, а вспомогательные потребители питаются от другого сетевого источника.

Нордурал, Исландия

В настоящее время Исландская сеть становится все мощнее. Однако большая часть электроэнергии поступает от турбин с низкой инерционностью, работающих на геотермальном паре, а также за счет флуктуаций дневной и ночной потребности в электроэнергии. Алюминиевые заводы создают идеальную нагрузку. Большие изменения стабильности сети в течение суток требуют очень гибкого построения подстанции алюминиевого завода, чтобы был допустим высокоскоростной сброс нагрузки и рабочий режим с наивысшим качеством электропитания. Из-за этого требования в Нордурале решили использовать фильтры, подключенные к третичным обмоткам понижающих трансформаторов, а также тиристорные выпрямители для высокоскоростного сброса нагрузки.

Наивысшее качество электропитания было достигнуто за счет управления выпрямителями и вышеупомянутыми фильтрами (рис. 5).

Фьярдаал, Исландия

Этот алюминиевый завод с одним электролизным цехом мощностью 500 МВт будет питаться от вспомогательной гидроэлектростанции, расположенной на расстоянии примерно 60 км. На подстанции этой электростанции предусмотрена маломощная соединительная линия 132 кВ с общей сетью. Мощность для не основных потребителей алюминиевого завода будет браться с тех же линий, которые питают трансформаторы с выпрямителями. В том случае, если электролизер отключится, электростанцию будет нужно остановить, поскольку Исландская сеть будет не в состоянии принять излишнюю энергию. В течение начального пуска и нормального функционирования необходимо предусмотреть значения устойчивости к короткому замыканию от малых до очень малых.

Сохар, Оман

На этом новом алюминиевом заводе работают три электролизера мощностью по 550 МВт, питаемые от вспомогательной электростанции с комбинированным циклом. На подстанции этой электростанции предусмотрена соединительная линия 220 кВ с общей сетью, а расстояние между электростанцией и заводом составляет приблизительно 12 км. Энергия для не основных потребителей завода будет браться

с тех же линий, которые питают электролизеры. Как и в предыдущем случае, если отключится электролизер, электростанцию необходимо будет остановить, а устойчивость к короткому замыканию следует считать от малой до очень малой во время начального пуска и нормального функционирования.

Заключительные выводы

При обеспечиваемой электростанцией мощности короткого замыкания 2500 МВА и нагрузке алюминиевого завода 600 МВт соответствующее отношение этих величин, равное 4, представляет очень

слабую систему – предпочтительно иметь это отношение равным 10 или выше. Исходя из этого, была сделана оценка, что если на электростанции выключилась одна газовая турбина, то это, в свою очередь, приведет к отключению электролизера на заводе. Системы с диодными выпрямителями не способны быстро сбрасывать нагрузку, а система частотной разгрузки работающей автономно электростанции с газовыми турбинами может сработать менее чем за 2 с. Чтобы разрешить это противоречие, возможно, понадобится искусственная нагрузка, которая защитила бы электростанцию от полного останова в случае отключения

электролизера и обеспечила бы оптимальный режим пуска алюминиевого завода. Имеется два возможных способа защиты завода от отключения газовой турбины:

- электростанция проектируется так, чтобы можно было отслеживать нарастание и сброс нагрузки со стороны алюминиевого завода (то есть используется система ВРС компании АББ);
- завод оборудуется тиристорными выпрямителями, которые допускают мгновенный сброс нагрузки.

Ключ к нахождению наиболее оптимального технического решения связан с удовлетворением требований и к станции, и к заводу.

Если по договору с энергоснабжающим предприятием требуется соблюдать уровень суммарных нелинейных искажений не более 2% или значение коэффициента мощности не хуже 0,98, то применение фильтров токов гармоник, подсоединенных к третичной обмотке трансформатора – это самый экономичный метод. Этот метод также необходим при слабой устойчивости энергосистемы. Фильтры должны использовать синхронизированную коммутацию, чтобы уменьшить нагрузку от пускового тока и перенапряжения. Новая преобразовательная подстанция в Нордурале (Исландия) – наиболее совершенная в этом отношении – обладает следующими особенностями:

- трансформатор на весь диапазон стабилизации с фильтрами в третичной обмотке, обеспечивающий наиболее оптимальный коэффициент мощности;
- тиристорные выпрямители, которые отслеживают возможности сети по мощности;
- синхронизированная коммутация трансформаторов и фильтров для (а) минимальных искажений питания в очень слабой сети и (б) минимальной нагрузки на фильтры, распределительное оборудование и трансформаторы.

Макс Вайстнер

ABB Switzerland, Primary Aluminum
Баден-Дёттвиль, Швейцария
max.weistner@ch.abb.com

Георг Кёппель

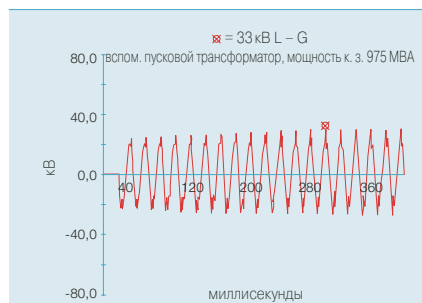
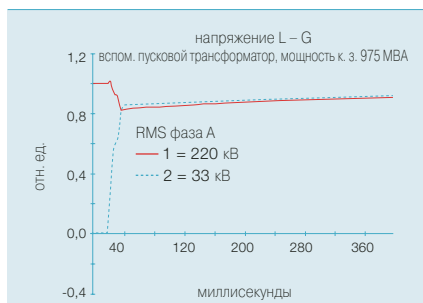
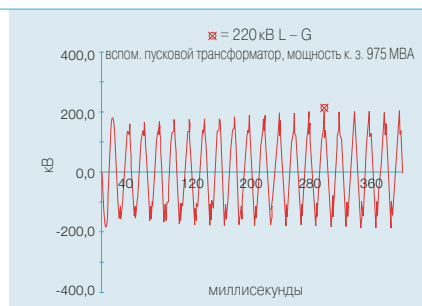
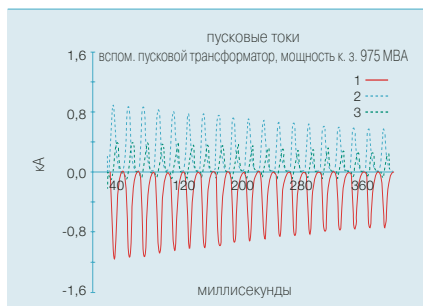
Консультант компании АББ по энергетике

Публикации по теме

- Metal Events Conference, Reykjavik Iceland 2004
- Metal Bulletin Conference, Oslo Norway 2004
- Metal Events Conference, Muscat Oman 2005
- Aluminium World, Bahrain Feature 2006/1
- Metal Events Conference, Dubai UAE 2006

6 Провалы напряжения на трансформаторах среднего напряжения при наличии управляемой коммутации и без нее.

а Пусковой стабилизирующий трансформатор



б Пусковой стабилизирующий трансформатор с синхронизированным включением

