

Использование компенсирующих устройств для решения проблем качества электроснабжения предприятий

Виктор Иткин, технический директор «Матик-Электро», г. Москва

В последнее время все более актуальной становится проблема контроля качества электроэнергии на предприятиях. Существуют производства с непрерывным циклом, где даже незначительное отклонение параметров сети от норм приводит к браку целой партии товара и длительной процедуре запуска линии. На других же производствах, таких как металлургические заводы, от качества электроэнергии напрямую зависит качество и состав получаемой продукции. Одна из наиболее часто встречающихся аномалий сети – повышенное содержание гармонических составляющих тока и напряжения. Обычно гармоники генерируются непосредственно на предприятии и являются следствием наличия нелинейной нагрузки, такой как дуговые печи и тиристорные преобразователи (инверторы, частотные приводы асинхронных двигателей). Повышенное содержание гармоник в сети может привести к перегреву трансформаторов, увеличению тока через емкостную нагрузку, ухудшению режима работы и перегреву двигателей. Потребление реактивной мощности само по себе не является параметром качества электроэнергии, но именно от «косинуса фи» - от отношения активной потребляемой мощности к полной зависят такие немаловажные параметры, как потери в подводящих линиях и загрузка трансформаторов.

Решить проблему избыточного потребления реактивной мощности можно путем внедрения конденсаторных установок компенсации реактивной мощности. Для фильтрации высших гармоник тока используют фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ), которые представляют собой набор колебательных контуров с резонансной частотой, примерно равной частоте гармоники, которую необходимо подавить. Каждый контур состоит из высоковольтного конденсатора и реактора, причем если необходимо одновременно с подавлением гармоник компенсировать и реактивную мощность, следует учесть, что наличие реактора снижает компенсирующую способность установки. Компенсирующая способность на основной частоте рассчитывается для каждого контура отдельно, а затем эти значения суммируются. Компенсирующая мощность контура рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_f = \frac{U^2}{(Z_C - Z_L)}, \quad (1)$$

где U – номинальное напряжение, приложенное к контуру,
 Z_C – сопротивление конденсатора при номинальной частоте,
 Z_L – сопротивление реактора при номинальной частоте.

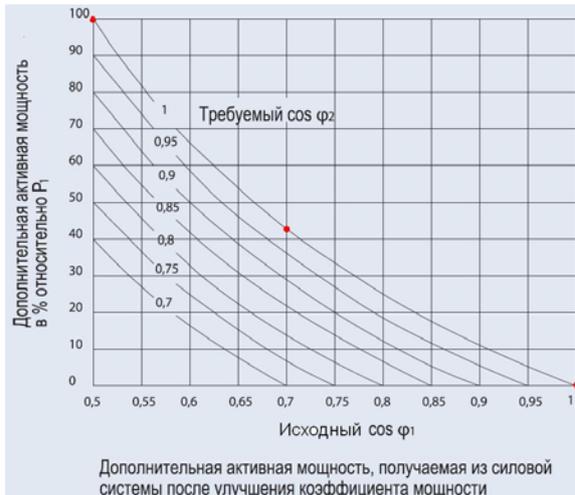


Рисунок 1

при исходном $\cos(\phi_1)=0.7$ и требуемом $\cos(\phi_1)=1$, приращение мощности равно 41%, при исходном $\cos(\phi_1)=0.5$ и требуемом $\cos(\phi_1)=1$, приращение мощности равно 100%.

При быстроменяющейся нагрузке (дуговые печи, подъемные краны, мощные лифты и компрессоры), где использование обычных контакторов для включения конденсаторов невозможно, также есть решение проблемы компенсации реактивной мощности. Это решение – применение тиристорных ключей для включения конденсаторов. Их преимущество перед обычным контакторным включением – повышенное быстродействие (до 20 мс), а также щадящий режим включения конденсаторов. Тиристорный ключ подключает конденсатор при минимальной разности потенциалов между соответствующей обкладкой конденсатора и сетью, а отключает его в момент перехода тока конденсатора через ноль. Тем самым продлевается срок службы конденсаторов.

Еще один важный параметр качества электроэнергии – установившееся отклонение напряжение от номинального. Особенно эта проблема актуальна для высоких напряжений (35-110-220-330 кВ), где длина линии передачи электроэнергии может достигать 500 км. Понятно, что на такой длинной линии будет падение напряжения, а вследствие сезонных изменений типа нагрузки, это падение будет неодинаковым в течение года. Казалось бы, можно повысить напряжение в начале линии, чтобы в конце линии поддержать заданный уровень напряжения. Но в этом случае есть ряд подводных камней. Первый камень – увеличение расходов для поддержания прежнего тока при повышении напряжения. Второй камень – тот факт, что ограничение по наибольшему рабочему напряжению электрооборудования диктуется надежностью работы изоляции, так как постоянное повышенное напряжение вызывает ускоренное старение изоляции и выход ее из строя. Решением вопроса поддержания заданного уровня напряжения может быть установка батареи статических конденсаторов на конце линии. На рисунке 2 схематично приведена линия передачи с источником в начале линии и потребителем в конце.

Применение компенсаторов реактивной мощности (КРМ) является одним из самых доступных способов разгрузить трансформатор (и подключить к нему дополнительную активную нагрузку). На рисунке 1 приведен график зависимости дополнительной активной мощности, которую можно подключить к трансформатору, от исходного и полученного $\cos(\phi_1)$. На графике 3 характерные точки отмечены красным. При исходном $\cos(\phi_1)=1$ и требуемом $\cos(\phi_1)=1$, приращение мощности равно нулю,

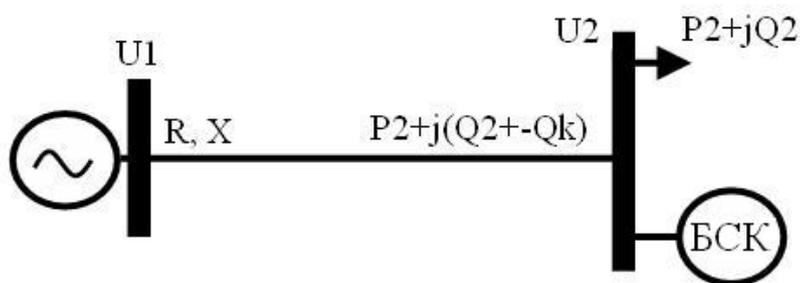


Рисунок 2.

где U_1 – напряжение в начале линии,
 U_2 – напряжение у потребителя,
 R, X – активное и реактивное сопротивление линии,
 P_2, Q_2 – потребляемая нагрузкой активная и реактивная мощность,
 $БСК$ – батарея статических конденсаторов,
 Q_k – реактивная мощность установки.

Как известно, напряжение на конце линии выражается следующей формулой:

$$U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - \frac{P_2 R + (Q_2 - Q_k) X}{U_1} - j * \frac{P_2 X - (Q_2 - Q_k) R}{U_1}, \quad (2)$$

где ΔU – падение напряжение на конце линии.

Причем, до 220 кВ допускается пренебрегать последним членом уравнения – поперечной составляющей потери напряжения, и вести расчет лишь для продольной составляющей.

Тогда в идеале, чтобы падение напряжение на конце длинной линии было нулевым, мощность батареи статических конденсаторов должна составлять:

$$Q_k \approx P_2 \frac{R}{X} + Q_2 \quad (3)$$



Таким образом, появляется возможность регулирования напряжения у потребителя путем изменения реактивной мощности нагрузки, применяя батареи статических конденсаторов.

Одним из примеров успешного решения проблемы падения напряжения на конце линии передач является батарея статических компенсаторов (БСК), установленная в Якутии. Основной предпосылкой для

реконструкции линии передач и установки компенсирующих устройств была высокая длина линии передачи электроэнергии и связанные с этим высокие потери. Длина линии была более 300 км, соответственно на таком расстоянии индуктивность линии была существенной, вследствие чего потери при передаче электроэнергии достигали 22%. Номинальное напряжение линии составляло 110 кВ, было принято решение о внедрении системы поперечной компенсации. В качестве компенсирующего устройства была предложена батарея статических конденсаторов 26 Мвар на номинальное напряжение 110 кВ. После внедрения в эксплуатацию, по результатам квартального отчета потери в линии сократились на 15% по сравнению с тем же периодом предыдущего года. Отдельно главным энергетиком была отмечена оперативность поставки и монтажа БСК, а также высокий экономический эффект применения компенсации реактивной мощности.

Компания «Матик-Электро» является не только одним из крупнейших производителей конденсаторных установок компенсации реактивной мощности в нашей стране, но также имеет сертифицированную электролабораторию и лицензии на проектирование и строительство зданий 1 и 2 уровней ответственности. Это позволяет производить замеры параметров качества электроэнергии и других показателей электросети предприятия, а также осуществлять монтаж оборудования до 110 кВ «под ключ».

Недавно нашу компанию пригласили как эксперта оценить качество электроэнергии на один из крупнейших картонно-бумажных комбинатов Поволжья. На этом предприятии планировалась плановая реконструкция подстанций 6/0.4 кВ. Целью измерений был анализ сети с последующей рекомендацией по снижению потерь в линиях. Измерения показали, что нагрузка на подстанциях – преимущественно индуктивная, - станки, насосы и вентиляторы.



При этом длина фидеров между ГПП 110/6 кВ и ПС 6/0.4 кВ нередко достигала нескольких километров. По результатам замеров главным энергетиком было принято решение установить устройства компенсации реактивной мощности на стороне 6 кВ на подстанциях, чтобы разгрузить подводящие кабели и трансформатор 110/6 кВ от избыточной реактивной мощности. После получения заявки требуемые установки компенсации реактивной мощности были изготовлены и внедрены в соответствии с требуемым план-графиком. После внедрения главным энергетиком комбината было отмечено снижение потребления реактивной мощности в среднем на 80%, уменьшение потерь в

подводящих кабелей в среднем на 17% и уменьшение температуры перегрева трансформатора 110/6 кВ на 7°C.

При необходимости компенсации реактивной мощности наряду с фильтрацией гармоник хорошим выходом является использование фильтро-компенсирующих устройств. На одном из предприятий Оренбургской области до 2008 г. существовала проблема падения напряжения на длинных линиях. Расстояние от головной подстанции до скважин по линиям 6 кВ превышало 12 км, что в два раза больше требований, предъявляемых к линиям данного класса напряжений. Нашей компанией были проведены замеры параметров электрической сети. В результате измерений было выявлено превышение уровнями высших гармоник напряжения начиная с 5-ой и заканчивая 37-ой предельно допустимых значений по ГОСТ 13109-97, а коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения достигал 23%, превышая предельно допустимые значения почти в четыре раза. В качестве решения были предложены не обычные установки компенсации реактивной мощности (КРМ), а фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ). Затем были проведены проектные работы, изготовлено и поставлено оборудование - ФКУ с компенсирующей способностью 1350 квар и установленной мощностью 945 квар. В результате внедрения данного оборудования удалось снизить уровень гармонических искажений до величин, требуемых ГОСТ 13109 – 97, и поднять напряжение на концах линий 6 кВ до требуемого уровня по ГОСТ 721 – 77.

Но не всегда использование ФКУ является оптимальным решением проблемы повышенного содержания высших гармоник в сети. В нашу лабораторию обратился главный инженер крупного складского терминала Московской области с просьбой провести анализ качества электроэнергии. Главный инженер искал причину выхода из строя шунтирующих конденсаторов в металлогалогеновых лампах, в большом количестве используемых для освещения складов. Сразу было предположение о повышенном уровне гармоник, либо повышенном уровне напряжения. Анализ качества сети на питающих подстанциях не выявил каких-либо аномалий. Однако, в корпусах по мере приближения к нагрузке – лампам – все повышался уровень 3 и 9-ой гармонических составляющих напряжения, значение напряжения основной гармоники оставалось в пределах нормы. На главном распределительном щите уровень 3-ей гармоники превышал нормально допустимое значение по ГОСТ 13109-97 в 1.5 раза, а непосредственно на щите освещения уровень 3-ей гармоники превышал предельно допустимое значение в 1.3 раза.

Чем опасна третья гармоника и другие гармоники, кратные трем? В сбалансированной (симметричной) трехфазной системе гармонические (синусоидальные) токи во всех трех фазах сдвинуты на 120 градусов по отношению друг к другу, и в результате сумма токов в нейтральном проводнике равна нулю. Следовательно, не возникает и падения напряжения на проводнике нейтрали в кабеле. Гармоники с номерами, кратными трем (не считая четные

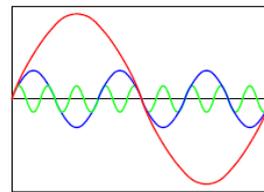
гармоники, образование которых не допускает кривая намагничивания трансформатора) можно выразить следующей формулой:

$$U_A = U_B = U_C = U_m (k\omega t + \varphi_k), \quad (4)$$

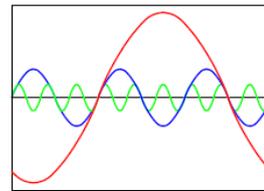
где U_A, U_B, U_C – напряжение гармоник с номерами, кратными трем,
 U_m – амплитуда напряжения,
 $k=3(2n+1)$, где $n=0,1,2\dots$ - номер гармоники,
 ω – угловая частота, $\omega=2\pi f$,
 φ_k – начальный сдвиг фазы первой гармоники напряжения.

В трехфазных цепях они сдвинуты на 360 градусов друг к другу, совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Нечетные гармоники, кратные третьей, суммируются в проводнике нейтрали (рисунок 3).

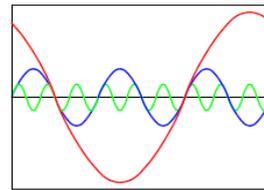
В результате, все гармоники с номерами кратными трем, суммируются по фазам и накапливаются в нейтрали. В результате ток в нейтрали может даже превышать фазные токи. Неправильно спроектированные четырехпроводные кабельные линии могут перегреваться вплоть до воспламенения, подтверждая тем самым необходимость увеличения сечения проводников нейтрали трехфазных кабелей сети электропитания. Гармоники, кратные третьей, приводят к падениям напряжения как в нейтрали, так и в фазных проводниках, вызывая искажения



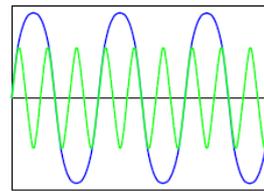
Ток в фазе А



Ток в фазе В



Ток в фазе С



Ток в нейтрали

Рисунок 3.

формы напряжения на других нагрузках, подключенных к этой сети.

В таблице 1 показано распределение токов гармоник на щите освещения:

Таблица 1.

	Номер гармоники	Фазный ток, А	Ток в нейтрали, А
50 Гц	1	36	0
150 Гц	3	11	33
250 Гц	5	2	0
350 Гц	7	1	0
450 Гц	9	5	15
I RMS		38	36

Анализ полученных при измерении данных показал, что непосредственно металлогалогеновые лампы и являются источниками гармонических составляющих. А так как все линии по одной фазе в распределительном щите электрически связаны, гармоники, генерируемые одной линией ламп, свободно перетекали на соседнюю. С учетом того, что гармоники с номерами кратными трем всех фаз суммируются в нейтрали, была очевидной необходимость применения дополнительных фильтрующих устройств в щитах освещения. Малая группа ламп, подключенная к «чистой» подстанции практически не повлияла на содержание гармоник в сети, поэтому был сделан вывод, что на увеличение уровня гармоник влияло именно большое количество установленных ламп.

Очевидно, что кабели трехфазной сети освещения складского комплекса были спроектированы без учета специфики работы с данной нагрузкой.

Было предложено установить на каждой линии ламп фильтр, не пропускающий нечетные гармоники, начиная с 3-ей и заканчивая 19-ой, что вполне удовлетворяло начальным условиям поставленной задачи. В состав фильтра входит специальный трансформатор, который замыкает на себе гармоники, кратные трем, и набор колебательных контуров, гасящих остальные гармоники. В результате гармоники, генерируемые одной группой ламп, не перетекали на соседние группы, тем самым снижая содержание 3-ей гармоники напряжения в сети и уменьшая ток в нейтрали. После установки фильтров было отмечено снижение уровня 3-ей гармоники до значений, допустимых ГОСТ 13109-97, конденсаторы в лампах перестали выходить из строя, ток в нейтрали линии от щитов освещения до главного распределительного щита уменьшился с 36 А до 4.5 А.

Опыт внедрения различных видов конденсаторных установок и фильтров гармоник показывает, что использование компенсирующих устройств различной конфигурации является оптимальным решением большинства проблем качества электроснабжения на предприятиях.