

## Качество электроэнергии в руках проектировщика

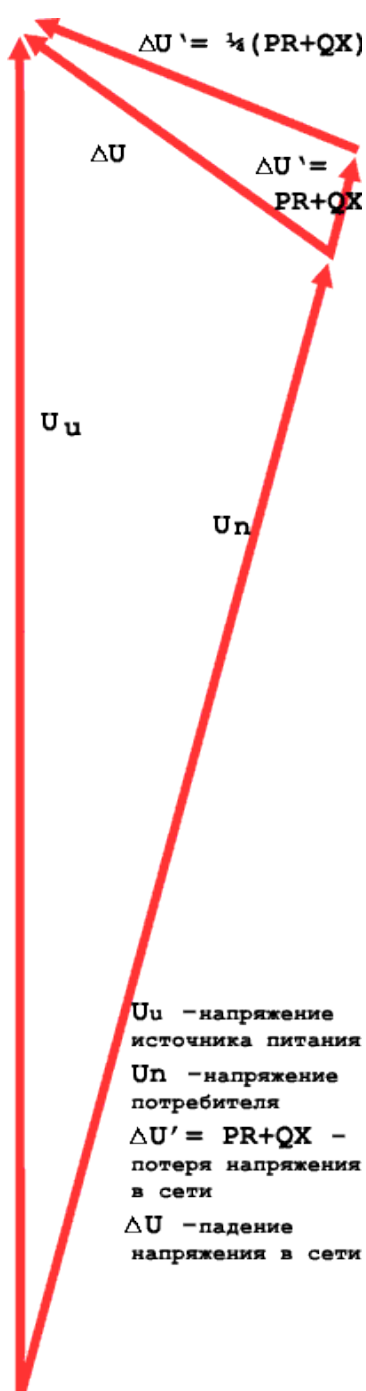


Автор: В.С.Фишман, технический директор  
ООО «Нижегородский Электропроект».

Статья опубликована в журнале «Новости электротехники», №3(27) 2004

Сайт журнала: <http://www.news.elteh.ru>

Показатели качества электроэнергии в сети потребителя во многом зависят от правильного выбора схемы электроснабжения, то есть, в конечном счете, от мастерства проектировщика, его знаний и опыта. В распоряжении создателей проектов достаточно способов и инженерных ресурсов для решения этой проблемы. Задача проектировщика – грамотно распорядиться имеющимися возможностями.



Современному потребителю электроэнергии требуется надежная и экономичная система электроснабжения, построенная с соблюдением действующих норм в отношении качества электроэнергии. Вопросы качества энергии в сети потребителя решаются ещё на стадии проектирования, когда многое зависит от профессионализма проектировщика. Во времена СССР работать над проектами было проще, поскольку, кроме норм и правил, содержащих требования к системе электроснабжения и устройству электроустановок, существовали многочисленные и почти бесплатные нормативы, указания и пособия по проектированию, выпускавшиеся проектными организациями страны, такими, как ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», ВГПИ «Энергосетьпроект», Гипромез, ГПИ «Электропроект», ВНИПИнефть и др. В новых экономических условиях количество нормативных требований не уменьшилось, скорее наоборот, выросло, пособия по проектированию некоторые организации и сегодня предлагают, но уже на коммерческой основе, а типовое проектирование почти полностью прекратилось. В результате в области ноу-хау проектной деятельности образовался определенный вакуум, который усугубляется ещё и тем, что практически сменилось поколение проектировщиков, ушли опытные кадры, на смену которым пришли молодые, не всегда владеющие необходимыми знаниями.

### Качество теряется на последней ступеньке

Изначально качество электроэнергии зависит от производителя, однако в процессе транспортировки к потребителю её качественные показатели изменяются. Их ухудшение чаще всего происходит на конечном участке системы электроснабжения, т.е. непосредственно в распределительных сетях и системе электроснабжения потребителя.

На мой взгляд, это объясняется тем, что источники питания, магистральные сети и подстанции энергосис-

темы проектируются и эксплуатируются профессиональными организациями бывшей системы Минэнерго, а распределительные сети потребителей во многих случаях проектируются (и эксплуатируются) многочисленными организациями, уровень профессиональной подготовки которых в этой области оставляет желать лучшего.

Качество электроэнергии в Российской Федерации определяется ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», содержащим целый ряд соответствующих показателей. Рассмотрим, как меняются показатели качества электроэнергии в процессе передачи к потребителям.

Всякая система электроснабжения характеризуется импедансом, т.е. активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями. Каждая из этих составляющих по-своему влияет на показатели качества. Падение напряжения при передаче электроэнергии к потребителю характеризуется формулой:

$$\Delta U = \frac{PR + QX_e}{U} + j \frac{PX_e - QR}{U}, \quad (1)$$

где  $\Delta U$  – падение напряжения в системе электроснабжения;

$P$  и  $Q$  – активная и реактивная составляющие мощности, передаваемой потребителю;

$R$ ,  $X_e$  – активное и индуктивное сопротивления сети.

Формула падения напряжения содержит действительную и мнимую части.

Действительная часть

$$\frac{PR + QX_e}{U}$$

называется «потеря напряжения» и характеризует изменение величины напряжения, а мнимая часть

$$j \frac{PX_e - QR}{U}$$

характеризует фазовый сдвиг напряжения у потребителя относительно напряжения источника питания (см. рис.1). Для потребителя важна величина действительной части, т.е. потери напряжения. Мнимая часть – фазовый сдвиг, как правило, не играет существенной роли.

Из формулы (1) видно, что чем больше активное и индуктивное сопротивления системы электроснабжения, тем больше потеря напряжения в ней. При этом для сетей выше 1000 В характерно соотношение  $R < X$ , а при малых сечениях проводников  $R \gg X$ .

Что касается величин нагрузки  $P$  и  $Q$ , то на первую из них проектировщик повлиять не может, в то время как на вторую ( $Q$ ) может, применяя устройства компенсации реактивной мощности. Очевидно также, что потери напряжения непостоянны во времени, поскольку зависят от передаваемых мощностей  $P$  и  $Q$ , величина которых меняется. Эти изменения бывают медленными, например, суточными или сезонными, которые обуславливают величину отклонения напряжения, и быстрыми. В последнем случае это колебания напряжения, возникающие в процессе работы потребителей с резко переменной нагрузкой или связанной с пуском крупных электродвигателей.

Кроме потери напряжения, в системе электроснабжения могут иметь место искажения синусоидальности напряжения, вызванные так называемой «нелинейной нагрузкой», создающей высшие гармоники в системе электроснабжения. Величина этих искажений зависит не только от источников высших гармонических составляющих, но и от величины и соотношения составляющих импеданса системы электроснабжения.

За счет неравномерности нагрузки по фазам может иметь место несимметрия напряжения в сетях среднего напряжения, а в сетях до 1000 В с глухозаземленной

нейтралью ещё и неуравновешенность напряжения, величины которых в общем случае также пропорциональны импедансу системы электроснабжения.

Следует остановиться на влиянии емкостной составляющей импеданса системы электроснабжения. По сравнению с индуктивным сопротивлением, величина емкостного сопротивления кабельных, а тем более воздушных сетей среднего напряжения достаточно велика, поэтому существенного влияния на передачу электроэнергии этот параметр не оказывает. Однако он непосредственно влияет на ток однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях 6–35 кВ и возникающие при нем перенапряжения.

## ***Классические принципы современных схем***

### **Снижение импеданса системы электроснабжения**

Как следует из вышеизложенного, первая задача состоит в том, чтобы по возможности минимизировать импеданс системы электроснабжения и его отдельные составляющие. Однако решение этой задачи ограничено определенными рамками.

Так, величина активного сопротивления системы электропередачи определяется ещё и такими понятиями, как допустимые токовые нагрузки проводников и экономическая плотность тока. Снижение величины активного сопротивления возможно путем увеличения сечения проводников по сравнению с требуемым по условиям допустимых токовых нагрузок, и на это приходится идти, особенно в случаях низковольтной сети. Это связано с дополнительными капитальными затратами, поэтому необходимо считать, что выгоднее: увеличивать сечение проводников в низковольтной сети или поставить дополнительный трансформатор 6(10)/0,4 кВ (принцип «дробления источников питания и приближения их к центрам нагрузок»). С этой же целью в ряде зарубежных стран, а частично и в нашей, применяется напряжение 660 В вместо 380 В.

Индуктивная составляющая импеданса системы электроснабжения в сетях среднего напряжения (6–35 кВ) больше других оказывает влияние на показатели качества напряжения, такие, как уровни и колебания напряжения, несимметрия и несинусоидальность.

Однако индуктивная составляющая не может быть уменьшена ниже определенных пределов. Эти пределы определяются допустимыми для электрооборудования значениями токов короткого замыкания (ТКЗ).

### **Рациональное построение схемы электроснабжения.**

При наличии потребителей с резкопеременной и нелинейной нагрузкой большое значение имеет рациональное построение схемы электроснабжения, при которой указанные потребители выделяются на отдельные секции шин с повышенным значением ТКЗ, в то время как для секций, питающих спокойную нагрузку, применяются более низкие уровни ТКЗ. Это в ряде случаев позволяет значительно сократить капитальные затраты на электрооборудование.

### **Применение эффективных способов ограничения токов короткого замыкания**

Существует целый ряд способов ограничения токов короткого замыкания в системах электроснабжения, которые с точки зрения ограничения импеданса дают разный эффект. Так, применение понижающих трансформаторов с расщепленной вторичной обмоткой

6–10 кВ в общем случае предпочтительнее применения токоограничивающих реакторов, поскольку становятся меньше потери активной мощности, секции РУ-6(10) кВ электрически разделяются, снижается величина емкостного тока ОЗЗ.

Это не исключает применения в обоснованных случаях сдвоенных и одинарных реакторов. Могут также использоваться и другие способы, например, разукрупнение мощности понижающих трансформаторов и т.п. Выбор этих способов должен производиться с учетом всего многообразия факторов и на основании технико-экономических расчетов.

## **Арсенал проектировщика**

### **Коррекция уровней напряжения**

Для коррекции медленных изменений напряжения (отклонений напряжения) в сетях 6, 10 кВ применяются устройства регулирования напряжения под нагрузкой силовых понижающих трансформаторов 110(35)/6(10) кВ.

К сожалению, многолетнее использование этих устройств показало их невысокую надежность, поэтому эксплуатация, как правило, не допускает их частую работу, в том числе в автоматическом режиме.

С этой же целью применяется регулирование возбуждения крупных синхронных электродвигателей.

Наиболее широко для коррекции напряжения в сетях 0,4 кВ применяется регулирование мощности конденсаторных батарей. При выборе способа регулирования конденсаторных батарей необходимо учитывать их тройное назначение:

- компенсация реактивной мощности до экономически выгодных значений, рассчитываемых и задаваемых потребителю энергосистемой;
- повышение пропускной способности сети;
- коррекция уровня напряжения.

В связи с этим правильный выбор алгоритма управления конденсаторной батареей подчас представляет сложную задачу. Пока эту задачу, как правило, упрощают. Например, применяют широко распространенный способ регулирования путем поддержания определенного, заранее установленного значения  $\cos \varphi$ . Однако этот способ не всегда можно применить. Например, в часы максимальных нагрузок компенсация реактивной мощности должна быть максимальной и соответственно следует держать наибольшее значение  $\cos \varphi$ , а в часы минимальных нагрузок, особенно в ночное время, когда напряжение в системе повышается, необходимо пониженное значение  $\cos \varphi$ . Применяется также регулирование КБ по принципу поддержания постоянства потребляемой из системы реактивной мощности, который хотя и ближе, но все еще далек от оптимального. Вообще, выбор способа регулирования мощности конденсаторных батарей заслуживает отдельной статьи.

Если отвечающий всем требованиям алгоритм управления конденсаторной батареей оказывается слишком сложным, то надо выбирать приоритетные направления из указанных выше, которые в каждом случае могут быть разными.

### **Коррекция колебаний напряжения**

Перечисленные выше устройства коррекции уровней напряжения неэффективны в условиях быстрых изменений тока нагрузки, вызывающих колебания напряжения.

Требования ГОСТ 13109-97 к допустимым значениям колебаний напряжения ещё более жесткие, чем к уровням напряжения, что связано с колебанием светового потока ламп, отрицательно влияющим на зрение человека.

Для частоты колебаний нагрузки, имеющих место при работе главных двигателей крупных прокатных станов, существуют быстродействующие статические компенсаторы реактивной мощности, представляющие собой довольно сложную комбинацию реактора, управляемого с помощью тиристоров, и включенную параллельно ему нерегулируемую конденсаторную батарею. Однако широкое применение этого громоздкого, сложного и дорогого устройства для других целей практически исключено. Применение конденсаторных установок поперечной компенсации для устранения колебаний напряжения, как правило, неэффективно в связи с недостаточным быстродействием.

Для уменьшения колебаний напряжения применяется ещё один способ – использование установок продольной компенсации. При этом в питающую линию последовательно включается конденсаторная батарея. В этом случае колебания напряжения определяются, как:

$$\Delta U = \frac{PR + Q(X_e - X_c)}{U}$$

Поскольку в сетях 6–35 кВ  $R \ll X_e$ , то колебания напряжения определяются в основном реактивной составляющей:

$$\Delta U \approx \frac{Q(X_e - X_c)}{U}$$

т.е. за счет емкостного сопротивления конденсаторов они резко снижаются.

Как правило, для уменьшений величин колебаний напряжения и устранения их влияния на других потребителей наиболее рациональными являются следующие схемные решения:

- выделение потребителей 6–35 кВ с резкопеременной нагрузкой на отдельные трансформаторы или расщепленные обмотки 6–10 кВ трансформаторов;
- питание потребителей с резкопеременной и спокойной нагрузкой от разных ветвей сдвоенных реакторов 6–10 кВ;
- в сетях до 1000 В питание крупных потребителей с резкопеременной нагрузкой, например, сварочной, целесообразно предусматривать от отдельных трансформаторов;
- для не слишком крупных потребителей с резкопеременной нагрузкой в низковольтной сети иногда может оказаться достаточным выделение их на отдельную сборку шин, питающуюся отдельным фидером со щита 0,4 кВ силового трансформатора и т.п.

На практике установки продольной компенсации не нашли широкого применения из-за некоторых технических проблем. Так, при повреждении за конденсатором токи короткого замыкания резко возрастают, а напряжение на конденсаторе резко повышается, что требует применения специальных быстродействующих устройств защиты. В некоторых случаях, например, при пусках электродвигателей, могут возникнуть явления субрезонанса.

Проектировать, не создавая новых проблем

Из всего вышеизложенного очевидно, что многие проблемы качества электроэнергии так или иначе связаны с величиной импеданса системы электроснабжения и его отдельных составляющих. При этом, чем больше величина этих составляющих, тем острее становятся проблемы с качеством. Поэтому при проектировании надо стремиться к минимизации импеданса системы электроснабжения.

Для достижения этой цели следует шире применять такие технические решения, как:

- дробление мощности источников питания в сетях среднего и низкого напряжения с целью применения глубоких вводов высокого напряжения в центры нагрузок;

- глубокое секционирование систем шин с целью локализации влияния колебаний и посадок напряжения в системе электроснабжения;
- выделение потребителей с резкопеременной нагрузкой на отдельные расщепленные обмотки силовых трансформаторов и реакторов, а в низковольтной сети – на отдельные трансформаторы или отдельные силовые сборки;
- оптимальные методы регулирования мощности конденсаторных батарей и др.

В заключение следует отметить, что в настоящей статье затронуты лишь наиболее важные вопросы проектирования систем электроснабжения, касающиеся в основном промышленных предприятий.