

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИНЕРГЕТИКА ПРИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

И. Н. Ковалёв

Внедрение рыночных принципов управления энергосистемами открыло новые возможности в решении проблемы компенсации отстающих реактивных мощностей (КРМ). К сожалению, это эффективнейшее средство энергосбережения используется на примитивном уровне (пропорциональная компенсация) и практически не применяется в России. Рассмотрим особенности КРМ в постреформенной электроэнергетике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

компенсация реактивных нагрузок,
энергосистема,
распределительные сети,
сетевая модель,
синергетические особенности,
кратность эффекта
в энергосистеме

Немного истории и постановка вопроса

В связи с реформированием экономики в целом и электроэнергетики в частности проблема компенсации отстающих реактивных мощностей приобрела новые черты и особенности. Попытки системно ее решать посредством оптимизационных программ в конце 1980-х годов не привели к значимым практическим результатам из-за спада электрических нагрузок и возникших перестроечных организационных трудностей. Маловероятно, что в перспективе появится возможность вернуться к системно-оптимизационным методам размещения компенсирующих устройств (КУ).

Но одновременно, именно в связи с внедряемыми рыночными принципами управления энергосистемами, открылись новые альтернативы в эффективном использовании КРМ. К сожалению, это эффективнейшее средство энергосбережения используется у нас явно недостаточно по объему и неоптимально по размещению в сетях [1].





Игорь Николаевич Ковалев

канд. техн. наук, доцент Института управления, бизнеса и права, специалист международного уровня в области теории энергетических систем. Автор уникальных научных исследований в области современной экономики: Макроэкономика. Ростов н/Д.: Ростовский гос. пед. университет, 1995. 308 с.; История экономики и экономических учений. Ростов н/Д.: Феникс, 1999. 544 с.; Национальная экономика. Ростов н/Д.: Феникс, 2009. 345 с.; Электроэнергетические системы и сети: учебник. М.: ФГБОУ, 2015. 363 с.

Эффект от компенсирующих устройств

Заметим, что КУ по своим физико-техническим возможностям многофункциональны в части повышения качества электроэнергии (регулирование напряжения, симметрирование в сети, компенсация высших гармоник). Но в данной работе будем рассматривать ее базовое, имманентное технико-эко-

#терминология

Синергия – суммирующий эффект взаимодействия двух или более факторов, характеризующийся тем, что их действие существенно превосходит эффект каждого отдельного компонента в виде их простой суммы, эмерджентность.

номическое энергосберегающее свойство – снижать потери активной мощности ΔP (кВт) и электроэнергии ΔW (кВт•ч) в любых вариантах использования.

Охарактеризуем предполагаемый эффект по энергосистемам РФ такими цифрами: размещение у потребителей даже 50 % максимально целесообразной суммарной мощности (КУ) по критерию минимума приведенных затрат снижает указанные потери на 1,5–2,0 % от современного уровня потерь 12–15 %. Ежегодная экономия может составить порядка 15 млрд кВт•ч, что по современным ценам на электроэнергию соответствует доходу 75 млрд руб. Для этого нужно оптимально разместить около 60 Гвар КУ, что обойдется в 160–200 млрд руб. инвестиций. Нетрудно видеть высокую рентабельность этих инвестиций.

Синергетический принцип КРМ

Возникает вопрос, в чем заключаются упомянутые новые возможности в деле КРМ и с чего следует начинать.

Прежде всего, констатируем хрестоматийное: основная составляющая эффекта КРМ приходится на сети энергосистем (ЭС), и именно поэтому для распределительных сетей (РС) напряжением ниже 110 кВ задания по КРМ задаются энергоснабжающими организациями (сейчас много внимания уделяется математическим моделям и не учитывается этот определяющий момент). Строгое обоснование этого

положения дается в [2], но лишь на основе структурно-сетевых факторов. Современная же рыночная среда в рассматриваемой проблеме предполагает и дополнительные соображения, чему и посвящена настоящая статья.

Прежде всего речь идет о **синергетическом принципе КРМ**, основанном на том, что даже незначительная компенсация в распределительных сетях (РС) 0,4; 6,0; 10,0; 27,5 (системы электроснабжения железных дорог) и 35 кВ в значительной мере мультиплицирует эффект снижения потерь в энергосистемах, особенно сильно проявляясь на первых шагах размещения КУ. И нужно уметь это рассчитывать и этим управлять [2, 3].

Думается, что оцененные далее большие возможности получения энергосберегающего эффекта подвигнут на выстраивание новых экономических взаимоотношений энергосистем с отдельными группами инициативных крупных потребителей.

Упрощенная сетевая модель (расчетный модуль). Синергетические особенности сети

Рассмотрим квадратичную модель энергосистемы [4] с числом N узлов с реактивными мощностями Q_j , к которым присоединяются различные РС напряжением ниже 110 кВ. Схема имеет один балансирующий узел – крупную электростанцию. Потери активной мощности в сети от протекания нагрузок Q_j выражаются квадратичной формой (см. формулу (1)).

Из формулы (1) следует, что потери определяются суммой всевозможных произведений пар нагрузок на соответствующие собственные и взаимные активные сопротивления. Например, составляющая потерь, непосредственно связанная с нагрузкой узла № 1, представляет собой сумму N слагаемых ($j = 1 \dots N$), как показывает формула (2).

Эта «взаимность» и обуславливает синергетическую особенность формулы (1) для потерь мощности, учитывая, что синергия определяется как совместное действие нескольких факторов в одном и том же направлении. Синергичность здесь особенно явственно проявляется именно в наших энергосистемах по причине **значительных потоков реактивной мощности**. Как следствие, эти факторы «взаимности» усиливают влияние парных нагрузок, образуя в результате дополнительный значительный эффект от произведения соответствующих величин.

Номер формулы в тексте	Формула
(1)	$\Delta P = (I/u^2) \cdot Q_{\text{т}} R Q$
(2)	$\Delta P_i = (I/u^2) \cdot \sum Q_i R_{ij} Q_j$
(3)	$\delta \Delta P_{330} = (R_{330}/U_{330}^2) \cdot [Q_{330}^2 - (Q_{330} - Q_k)^2]$ $= (R_{330}/U_{330}^2) \cdot (2Q_{330} \cdot Q_k - Q_k^2)$
(4)	$\delta \Delta P_{10} = (R_{10}/U_{10}^2) \cdot [Q_{10}^2 - (Q_{10} - Q_k)^2]$ $= (R_{10}/U_{10}^2) \cdot (2Q_{10} \cdot Q_k - Q_k^2)$
(5)	$\Lambda = [(R_{330}/R_{10}) \cdot (U_{10}^2/U_{330}^2)] \cdot [2Q_{330}/(2Q_{10} - Q_k)]$
(6)	$Z_Q = Q_{10}/Q_{330}$
(7)	$Z_k = Q_k/Q_{10}$
(8)	$\Lambda = 2 \cdot [(R_{330}/R_{10}) \cdot (U_{10}^2/U_{330}^2)]/Z_Q \cdot (2 - Z_k)$
(9)	$c = 0,66 \cdot [(I_{330}/I_{10}) \cdot (I_{10}/I_{330}) \cdot (U_{10}^2/U_{330}^2)] =$ $= 0,66 \cdot [(I_{330}/I_{10}) \cdot (U_{10}/U_{330}) \cdot (S_{10}/S_{330})]$
(10)	$S_{10}/S_{330} \approx (Q_{10}/Q_{330}) \cdot (0,7/0,44) = Z_Q \cdot 1,6$
(11)	$\Lambda = 2 \cdot 0,66 \cdot L^* \cdot 1,6 \cdot Z_Q/Z_Q(2 - Z_k) \approx$ $\approx L_u^*/(2 - Z_k)$

Обозначения в формулах

R и **Q** – квадратная матрица сопротивлений сети и матрица-столбец реактивных мощностей ее узлов; знак *t* – транспонирование матрицы

ΔP – потери активной мощности в сети от протекания нагрузок **Q**

u – напряжение сети

ΔP_i – потери активной мощности в сетевой модели от протекания реактивных мощностей Q_i

R_{ij} – элементы квадратной симметричной матрицы **R**, собственные ($i = j$) и взаимные ($i \neq j$) активные сопротивления узлов, составленной относительно базового узла

U_{330} и U_{10} – нижние индексы обозначают принадлежности величин к номинальным напряжениям 10 или 330 кВ

S_{10} и S_{330} – соответствующие полные мощности

Без потери общности упростим формулу (2), приняв все взаимные сопротивления одинаковыми, то есть $R_{ij} = R$. Это подразумевает энергосистему магистрального типа, а именно, например:

- концентрированная энергосистема с суммарной мощностью, допустим, $300 + j \cdot 200$, МВ•А;
- питается от мощной электростанции по 2-цепной воздушной линии 2×240 мм² напряжением 330 кВ и протяженностью, допустим, 250 км;
- в конце линии через посредство автотрансформаторов 330/220–110/10 питается пучок радиальных линий 10 кВ потребителей.

Пример эффекта снижения потерь

Рассмотрим одного потребителя с нагрузкой $1,4 + j \times 1,0$ МВ•А, подключенного к кабельной линии 10 кВ сечением 70 мм² и протяженностью 1,5 км (здесь и далее сечения определены по экономическим плотностям тока). Для последующего анализа понадобятся соответствующие два активных сопротивления данной схемы: сопротивление ВЛ 330 – 17 Ом, сопротивление кабеля 10 кВ – 0,7 Ом. Остальные сопротивления в этой последовательной цепи – генератор ЭС, повышающий трансформатор 20/330 кВ, автотрансформатор, понижающий трансформатор 10/0,4 кВ – численно относительно невелики и при желании могут быть учтены.

Предположим для простоты, что на шинах 0,4 кВ установлено КУ мощностью $Q_k = 1$ Мвар, обеспечивающее полную компенсацию реактивной нагрузки этой линии. Расчет эффекта снижения потерь в длинной кабельной линии и в двухцепной линии 330 кВ рассчитать нетрудно: $\delta \Delta P_{10} = 6$ кВт и $\delta \Delta P_{330} = 62$ кВт. Как видим, в линии 330 кВ **эффект снижения потерь почти в 10 раз больший**, хотя здесь реактивная нагрузка понизилась всего на половину процента и этим, казалось бы, можно пренебречь (!). Данный факт заслуживает подробного рассмотрения, поэтому формулу для снижения потерь в линии 330 кВ за счет установки в распределительной сети КУ представим в общем виде, см. формулу (3).

Формула (3) отражает свойство синергии электрической сети применительно к задаче КРМ: как видим, переменные Q_{330} и Q_k усиливают влияние друг на друга, сколь ни была бы мала величина Q_k , ее произведение на заведомо большую величину Q_{330} может дать, соответственно, очень большое снижение потерь, что мы и получили. Но теперь следует учесть и влияние активных сопротивлений линий, что расширит представления о синергии.

Кратность эффекта снижения потерь для энергосистемы

Получим формулу для расчета кратности возрастания эффекта по сравнению с распределительной сетью. Формула (3) для самой распределительной сети 10 кВ преобразуется в формулу (4). Искомая кратность представляет отношение формулы (3), пренебрегая здесь величиной Q_k^2 ввиду ее относительной малости, к формуле (4), что дает нам формулу (5).

Преобразуем формулу (5), введя относительные единицы для реактивных мощностей (формула (6)) и для степени КРМ (формула (7)). С учетом формул (6) и (7) кратность рассчитывается по формуле (8).

В формуле (8) упрощаем выражение в квадратных скобках, обозначая его через *c*:

а) выразим активные сопротивления через длины l_{330} и l_{10} и сечения F_{330} и F_{10} линий;

б) предположим, что выбор сечений ведется по экономическим плотностям тока;

в) учтем то, что эта плотность для кабельных линий в среднем в полтора раза превышает таковую для воздушных линий. В результате получим формулу (9).

Таблица

Вид распределительной сети	Выбор сечений проводов, А/мм ²	$L_u^* = \Lambda$, разы
Промышленная кабельная сеть 10 кВ	$j_{\text{эк.каб}} = 1,5 j_{\text{эк.вл}}$	3,0–4,0
Сельскохозяйственные сети 10 кВ	$j_{\text{эк.каб}}; j_{\text{эк.вл}}$	4,0–5,0
Сети 25 кВ систем электроснабжения железной дороги	По допустимому нагреву	2,0–2,5

В формуле (9) произведение первых двух круглых скобок (обозначим как L_u^*) в варианте пропорционального роста номинальных напряжений и длин линий равнялось бы 1. Но это, как известно, не так: длины *де-факто*, согласно статистике, растут в два и более раз больше, чем соотношение номиналов напряжений. Далее, соотношение S_{10} / S_{330} равнялось бы соотношению соответствующих реактивных мощностей при одинаковых коэффициентах мощности «наверху» и «внизу». Но, как правило, коэффициент реактивной мощности $\text{tg}\varphi_{10} \approx 0,5$, а $\text{tg}\varphi_{330} \approx 0,75$ из-за значительных потерь реактивных мощностей в понижающих трансформаторах; следовательно, $\sin\varphi_{10} \approx 0,44$ и $\sin\varphi_{330} \approx 0,7$. Поэтому S_{10} / S_{330} равно $1,6 \cdot Z_Q$ (см. формулу (10)).

В итоге значение кратности, определяемое по формуле (8), с учетом сделанных допущений и выкладок приобретает вид формулы (11).

Кратность эффектов снижения потерь активной мощности (и электроэнергии) Λ растет:

- с ростом степени компенсации Z_k и достигает максимума при полной компенсации, что было неочевидно;
- с ростом относительных длин L^* линий 110 кВ и выше.

И, что тоже неочевидно, кратность Λ не зависит от соотношения реактивных мощностей в ЭС и в отдельно взятой РС. Последнее утверждение верно только в случае, если сечения проводов и кабелей выбирались по экономической плотности тока. Если же сети 110 кВ и выше оказываются реально перегруженными или при выборе сечений округление шло в меньшую сторону, то перед формулой (11) появляется соответствующий коэффициент $Z_Q > 1$. Здесь начинает действовать синергетический эффект взаимодействия реактивных нагрузок «верха» и «низа» рассматриваемой магистральной модели ЭС.

В таблице представлены кратности Λ для разновидностей РС и значений L_u^* при $Z_k = 1$. При $Z_k = 0,5$ кратность Λ снижается в полтора раза.

Полная компенсация на всех радиусах распределительной сети

Для демонстрации эффективности «первых шагов КРМ» можно рассмотреть на принятой сетевой модели другую крайность компенсации – полную компенсацию на всех радиусах РС. Нетрудно убедиться, что эффект снижается с 10-кратного до 5-кратного, обусловленного только относительной удлинненностью линии 330 кВ. На первых шагах значительную роль играет синергетическая составляющая, на заключительных все определяется хрестоматийным эффектом: $\Lambda = L_u^* = 5$.

В условиях административного управления равномерной компенсацией, заведомо неэффективной, **появление групп потребителей с высокой степенью КРМ способно существенно снизить потери активной мощности и электроэнергии в ЭС**. Инвестиционные ресурсы для установок компенсирующих устройств потребители должны частично получать от энергосистем в виде пониженных тарифов на реактивную электроэнергию, что является классическим регулирующим атрибутом рыночной экономики. Такая ситуация по необходимости возникает и в случае, когда в РС установка КУ является необходимой по техническим причинам.

Выводы

1. Упрощенная модель энергосистемы с распределительной сетью позволила выявить порядок соотношения (кратности) эффектов компенсации реактивных нагрузок в обеих подсистемах в разных ситуациях.

2. Кратность эффекта КРМ значительно превышает единицу (может достигать до 10 и более) и зависит главным образом от двух факторов: во-первых, относительного удлинения сети напряжением 35 кВ и более, а во-вторых, от перегруженности этих сетей относительно экономической плотности тока.

3. Определять оптимальную степень КРМ нужно только на основе оптимизационных расчетов по питающим сетям энергосистем (специализированные программы и программы расчетов установившихся режимов работы), поскольку в РС потери мощности и электроэнергии относительно малы.

4. В современных условиях эксплуатации энергосистем РФ, перегруженных отстающей реактивной мощностью (в отличие, например, от стран ЕС), особая энергосберегающая роль принадлежит установкам первых 60 Гвар компенсирующих устройств в узлах с повышенной кратностью снижения потерь.

Литература

1. Воротницкий В.Э. Снижение потерь электроэнергии – важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // Энергосбережение. 2014. № 4. С. 52–56.
2. Ковалев И. Н. О направлениях исследований в области компенсации реактивных нагрузок // Электричество. 1981. № 10. С. 61–64.
3. Ковалев И. Н. Электроэнергетические системы и сети: учебник. М.: ФГБУ, 2015.
4. Ковалев И. Н. Метод расчета компенсации переменных реактивных нагрузок в электрических сетях. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1973. № 2. С. 79–90. ■