

$$K_E = \frac{E_e}{E_o},$$

де  $K_E$  – коефіцієнт послаблення за електричною складовою.

На рис.4 наведено розрахункові коефіцієнти послаблення при заміні поліетиленової (крива 1) та полівінілхлоридної (крива 2) оболонки металевим екраном. Видно, що ефективність екранування вища при заміні поліетиленової оболонки в порівнянні з полівінілхлоридною.

### Висновки.

1. В неекраниваних витих парах зменшити рівень витоку електричної енергії можливо за рахунок використання полімерних оболонок на основі наповнених поліетиленів. Це вирішує також проблему використання матеріалів на основі галогенів, зокрема хлору, та стеарату свинцю, які містяться в PVC оболонці. Останній використовується в якості стабілізатору для підвищення температури розпаду. В PVC пластикатах можуть також вводитися вуглекислий свинець, кальцій, кадмій, барій. Свинець та кадмій відносяться до заборонених з шести небезпечних речовин відповідно до директиви RoHS: *Restriction of use of Hazardous Substances – обмеження використання небезпечних речовин*. Дана директива обмежує використання потенційно небезпечних речовин в електротехнічному та електронному обладнанні, встановлює точні границі дозволених концентрацій цих речовин.

2. Ефективність екранування залежить від матеріалу полімерної оболонки: чим менша відносна проникненість матеріалу захисної оболонки, тим вище коефіцієнт послаблення електричної складової ЕМВ.

3. Застосування металевих екранів в витих парах потребує якісного заземлення та мережі телекомунікаційного заземлення.

**Список літератури:** 1. International Standard ISO/IEC 11801 Information Technology – Generic Cabling for Customer Premises. – 1995. – 104 p. 2. TSB -36. Technical Systems Bulletin/ Additional Cable Specifications for Unshielded Twisted Pair Cables.-5p. 3. *Бойко А.М.* Обґрунтування товщини ізоляції витих екраниваних пар структурованих кабельних систем/ *А.М. Бойко, Г.В. Безпрозванних* // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. -Т.1, вип. 2. – С. 22 – 30. 4. *Шапиро Н.Д.* Основы теории электромагнитного экранирования / *Н.Д. Шапиро* – Л.: Энергия. – 1975. – 112 с.

Надійшла в редколегію 03.10.2011

**Ю.Н. ВЕПРИК**, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

### ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТ УСТАНОВКИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

У роботі представлений алгоритм вибору оптимальних місць установки додаткових компенсуючих пристроїв з метою зниження втрат потужності в електричних мережах, який базується на урахуванні ступеня завантаження елементів мережі і часткових похідних від втрат по реактивних потужностях компенсуючих пристроїв, що встановлені.

В работе представлен алгоритм выбора оптимальных мест установки дополнительных компенсирующих устройств с целью снижения потерь мощности в электрических сетях, основанный на учете степени загрузки элементов сети и частных производных от потерь по реактивным мощностям устанавливаемых компенсирующих устройств.

The algorithm of choice of optimum places of setting of additional compensating devices is in-process presented with the purpose of decline of losses of power electric networks, based on the account of load of network elements and partials from losses on the reactive-powers of the set compensating devices.

**Постановка проблеми.** Развитие электрических сетей сопровождается увеличением потерь электрической энергии, отпускаемой в сеть. Это обусловлено увеличением средних расстояний между источниками и потребителями электроэнергии, отставанием сетевого строительства и недостатком в установке средств компенсации реактивной мощности. Поэтому задача снижения потерь мощности и энергии в электрических сетях с развитием энергосистем сохраняет свою актуальность.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Снижение потерь мощности и энергии в электрических сетях является важной составляющей общего комплекса энергосберегающих мероприятий. Одним из средств решения этой задачи является оптимизация параметров режима электрической сети – управление потоками мощности, регулирование напряжений в сети, установка и регулирование устройств компенсации реактивной мощности и др. [1,2].

**Цель, задачи исследования.** Компенсация реактивной мощности в сетях – одно из возможных и эффективных мероприятий, обеспечивающих снижение потерь в электрических сетях, однако эффективность этого мероприятия в значительной степени зависит от того, насколько удачно выбраны места установки дополнительных компенсирующих устройств (КУ) в электрической сети. В то же время алгоритмы поиска наиболее эффективных мест установки

дополнительных компенсирующих устройств еще требуют разработки и совершенствования, так как при неправильном выборе мест установки снижается их эффективность, что ведет к увеличению затрат без получения заметного положительного эффекта.

**Основной материал исследований.** Если электрическую сеть представить узловыми уравнениями в форме баланса мощностей:

$$P_i = g_{ii}U_i^2 - \sum_{j=1}^{N_i} U_i U_j (b_{ij} \sin \delta_{ij} - g_{ij} \cos \delta_{ij}) = P_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j), \quad (1)$$

$$Q_i = g_{ii}U_i^2 - \sum_{j=1}^{N_i} U_i U_j (b_{ij} \cos \delta_{ij} - g_{ij} \sin \delta_{ij}) = Q_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j),$$

где  $P, Q, U, \delta$  – мощности (активные и реактивные) и напряжения (модули и углы), то потери активной мощности  $\Pi$  при передаче электрической энергии по сети можно определить как алгебраическую сумму активных мощностей, генерируемых и потребляемых во всех  $N$  узлах сети:

$$\Pi = \sum_{j=1}^{N_i} P_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j). \quad (2)$$

Потери мощности  $\Delta P_{ij}$  в каждой ветви  $ij$  и в целом по сети (2) являются явными функциями узловых напряжений  $U_i, U_j$  и одновременно неявными функциями мощностей  $S_i$  в узлах сети, так как последние через уравнения баланса мощностей (1) определяют  $U_i, U_j$ .

Изменения реактивных мощностей в узлах  $Q_i$  приводят к изменениям узловых напряжений сети в соответствии с (1). Следствием этого, в свою очередь, является изменение потерь мощности в сети, как это видно из (2). При этом изменения реактивных мощностей должны соответствовать располагаемому диапазону регулирования источников и не вызывать недопустимых отклонений напряжения в узлах сети:

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}; U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}. \quad (3)$$

Выражения (1) – (3) составляют математическую формулировку оптимизационной задачи, которая состоит в том, чтобы определить места установки и мощность дополнительных КУ, при которых обеспечивается минимум целевой функции (2) и соблюдаются ограничения в форме равенств (1) и неравенств (3). В решении этой общей задачи целесообразно выделить две более узких: 1) выбор места установки дополнительных КУ в сети; 2) определение оптимальных мощностей КУ

в выбранных узлах. В данной статье речь идет о решении первой из этих двух задач.

Целевая функция (2) и уравнение (1) выражаются непрерывными дифференцируемыми функциями, поэтому решение задачи возможно на основе применения градиентных методов. Производные от потерь мощности  $\Pi$  по параметрам режима  $U_i, \delta_i$  можно получить дифференцированием функции (2):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial U_i} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} + \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_j}{\partial U_i}; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_i} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} + \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i}. \quad (4)$$

Слагаемые  $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}; \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i}; \frac{\partial P_i}{\partial U_i}; \frac{\partial P_j}{\partial U_i}$  в (4) являются элементами матрицы

Якоби, используемой в расчете нормального режима сети. Приращение мощностей  $\Delta P_i, \Delta Q_i$  и параметров режима  $\Delta U_j, \Delta \delta_j$  связаны между собой соотношениями:

$$\sum_{j=1}^N \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} \Delta U_j = \Delta P_i; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j = \Delta Q_i$$

получаемыми из (1). Поэтому приращения  $\Delta U_j, \Delta \delta_j$  модулей и углов векторов узловых напряжений, вызванные включением дополнительной реактивной мощности в одном из узлов сети можно определить, решив линеаризованную систему уравнений (5), в которой вектор-столбец заданных величин в правой части содержит лишь один ненулевой элемент – приращение реактивной мощности  $\Delta Q_j$  в узле  $i$ .

Зная производные (4) и вычислив приращение модулей и углов узловых напряжений при включении дополнительной мощности  $\Delta Q_j$  в узле  $i$ , в соответствии с теорией неявных функций [3] можно определить приращение потерь  $\Delta \Pi$ , вызванное включением  $\Delta Q_j$ :

$$\Delta \Pi_i = \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Pi}{\partial U_j} \Delta U_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j. \quad (6)$$

Тогда отношение приращения потерь  $\Delta \Pi$  к приращению реактивной мощности  $\Delta Q_j$  в узле  $i$  при малых  $\Delta Q_j$  можно принять равным соответствующей производной:

$$\frac{\partial P}{\partial Q_i} \cong \frac{\Delta P}{\Delta Q_i} \quad (7)$$

Чтобы определить производные от потерь при изменении реактивной мощности в каждом из N узлов сети, нужно один раз получить матрицу Якоби, выполнить ее обращение и, задавая в правой части уравнений (5) приращение поочередно в каждом из N узлов, вычислить соответствующие им векторы приращения  $\Delta \delta_i$ ,  $\Delta U_i$ , а затем – приращение потерь по выражению (6).

Расчеты производных от потерь  $P$  по реактивным мощностям, выполненные для реальных электрических сетей 110-330 кВ, показывают, что численные значения этих производных изменяются в очень широких пределах – от  $1 \cdot 10^{-5}$  до  $1 \cdot 10^{-1}$ . Для иллюстрации в Табл. 1 приведены результаты таких расчетов для фрагмента электрической сети 330-110 кВ Северной энергосистемы.

Таблица 1 – Влияние дополнительных КУ на потери мощности в сети

Номер узла компенсации	Потери активной мощности $P_{КОМ}$ , МВт	Снижение потерь $(\Delta P_{НОР})/\Delta Q_i$ , МВт/МВАр	Номера узлов в порядке приоритетности
10	3,5924	0,0094	6
11	3,5931	0,0087	9
17	3,5928	0,0090	8
18	3,5919	0,0099	1
20	3,5923	0,0095	5
21	3,5921	0,0097	3
22	3,5920	0,0098	2
24	3,5933	0,0085	10
25	3,5926	0,0092	7
26	3,5923	0,0095	4

Потери активной мощности в исходном нормальном режиме составляют  $P_{НОРМ} = 3,6018$  МВт. В Таблице приведены потери после установки дополнительных компенсирующих устройств для ряда узлов сети, удельное (на 1 МВАр) снижение потерь, номера узлов в порядке приоритетности (первые 10 узлов).

Величину производной  $\frac{\partial P}{\partial Q_i}$  можно считать показателем

эффективности установки дополнительных КУ в узле  $i$ , так как она характеризует снижение потерь мощности в соответствующем узле на 1 МВАр установленной дополнительной реактивной мощности. Следовательно, при выборе места установки дополнительных КУ с целью снижения потерь мощности в электрической сети предпочтение нужно отдавать узлам с наибольшим значением  $\frac{\partial P}{\partial Q_i}$  и по мере исчерпания возможностей регулирования в таких узлах переходить (если это экономически оправдано) к узлам с меньшими  $\frac{\partial P}{\partial Q_i}$ .

Расчеты по компенсации с реактивной мощности в электрических сетях показывают также, что если судить только по величине частных производных  $\frac{\partial P}{\partial Q_i}$ , то среди узлов, которые следовало бы выбрать в качестве мест установки дополнительных КУ, могут оказаться узлы, расположенные как в сильно-, так и в слабо загруженной части сети. Показателем, характеризующим степень загруженности линии можно считать отношение мощности  $P_{ij}$ , передаваемой по ВЛ, к её натуральной мощности  $P_{нат}$  (коэффициент загрузки ВЛ):

$$k_z = \frac{P_{ij}}{P_{нат}} \quad (8)$$

на том основании, что при передаче по ВЛ мощностей, больше натуральной ( $k_z > 1$ ) потребление реактивной мощности превышает её генерацию линией, что приводит к увеличению потерь активной мощности. Поэтому при выборе места установки дополнительных КУ необходимо учитывать также загрузку сети и из узлов с одинаковыми или близкими  $\frac{\partial P}{\partial Q_i}$  предпочтение отдавать узлам, к которым примыкают линии с коэффициентом загрузки  $k_z > 1$ .

В соответствии с изложенным для выбора оптимальных мест установки дополнительных КУ при решении оптимизационной задачи (1) – (3) представляется целесообразным использовать следующий алгоритм:

1. Выполнить расчет исходного режима и выделить загруженную часть сети;
2. Сформировать матрицу Якоби, соответствующую линеаризованным узловым уравнениям баланса мощностей по

напряжению исходного установившегося режима, и получить обратную матрицу Якоби;

3. Выполнить расчет частных производных от потерь мощности в электрической сети по модулям и углам узловых напряжений по формулам (4);

4. Выполнить расчет приращений модулей и углов  $\Delta U_i$ ,  $\Delta \delta_i$  узловых напряжений, соответствующих дополнительной реактивной мощности  $\Delta Q_i$  в каждом из узлов сети по уравнению (5);

5. Выполнить расчет приростов потерь  $\Delta P_i$  в загруженной части сети, вызванных дополнительными КУ и производных от потерь по мощности дополнительных КУ по формулам (6) – (7);

6. Выбрать места установки дополнительных КУ с учетом частных производных  $\frac{\partial P}{\partial Q_i}$  и загрузки сети.

#### **Выводы.**

Наиболее трудоемкие вычислительные операции (п.1–3), необходимые для реализации алгоритма, являются составной частью расчетов нормальных режимов электрической сети, и для решения задачи нужно лишь дополнить их расчетом производных от потерь по мощности дополнительных КУ.

Предлагаемый алгоритм выбора мест установки дополнительных КУ эффективен в сочетании с программой расчета установившегося режима методом Ньютона, при решении линеаризованных уравнений на шаге расчета блочным методом двойной факторизации [4], что подтверждается расчетами по выбору средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

**Список литературы:** 1. Потребич А.А. Эффективность выбора мероприятий по снижению потерь энергии в электрических сетях энергосистем / А.А. Потребич // Электрические станции. – 2001. – № 5. – С. 34. 2. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электрической энергии в электрических сетях / Ю.С. Железко, А.Р. Артемьев, О.В. Савченко. – Москва, Изд. НЦ ЭНАС. – 2002. 3. Самарский А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с. 4. Веприк Ю.Н. Задача математического моделирования стационарных режимов электрических систем в обобщенной постановке / Ю. Н. Веприк // Электротехника и электромеханика. — 2010. — № 3. — С. 59-61.

*Поступила в редколлегию 05.10.2011*

*Ю.Г. ГОНТАРЬ*, аспирант, НТУ «ХПИ»

### **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРОВОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОХОДНОГО ИЗОЛЯТОРА**

В статті розглянуті питання виникнення пробоя по поверхні твердого діелектрика, електричні схеми заміщення ізоляційних конструкцій та наведені основні закономірності для напруги та напруженості поля при поверхневому розряді. Було показано, що розподіл поля визначається в основному ємнісними процесами.

В статье рассмотрены вопросы возникновения пробоя на поверхности твердого диэлектрика, электрические схемы замещения изоляционных конструкций и приведены основные закономерности для напряжения и напряженности поля при поверхностном разряде. Было показано, что распределение поля определяется в основном емкостными процессами.

The questions of a breakdown on the surface of a solid dielectric, the electrical equivalent circuit of insulating structures and the basic laws for the stress and field intensity at the surface discharge. It was shown that the field distribution is mainly determined by capacitive processes.

**Введение.** В условиях испытаний и эксплуатации изоляции трансформаторов, электрических машин, кабелей и конденсаторов часто наблюдается явление электрического разряда вдоль поверхности изоляционного материала.

**Цель, задачи исследования.** Основная задача при рассмотрении поверхностных разрядов заключается в установлении зависимости разрядного напряжения от параметров, определяющих распределение поля. Важнейшими из них являются: геометрические размеры и форма изоляционной конструкции; расположение токоведущих частей; электрические характеристики диэлектрика и окружающей его среды; система напряжения. При перенапряжениях и при испытаниях изоляции выпрямленным напряжением на поверхности диэлектрика происходит образование объемного заряда.

В данной статье рассматриваются факторы, от которых зависит величина напряжения поверхностного пробоя (в частности его объемные и поверхностные свойства) при помощи электрических схем замещения электроизоляционных конструкций.

**Физический механизм процесса поверхностного разряда.** При поверхностном разряде возникают электроны, которые быстро уходят из сферы разряда благодаря их малой массе и значительной скорости. Приповерхностный слой диэлектрика содержит ряд дефектов (ловушек), на которых могут задерживаться электроны. Ловушками зарядов