

сти решения трансцендентного уравнения (17) при определении первого максимума тяжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. O l s z o w s k i, B. Calculation of Mechanical Effects in EHV Outdoor Substations at Short Circuit Currents / B. Olszowski, J. Orkisz, Z. Waszczyszyn // *Revue Electrotechnique*. – 1977. – Vol. 12, № 8. – P. 275–285.
2. M i r i, A. M. Dynamische Kurzschlusswirkungen in Hochspannung-Schaltanlagen mit Einfach- und Bundelleitern- Überblick / A. M. Miri, C. Heinrich // *Elektrizitätswirtschaft*. – 1980. Vol. 79, № 19. – S. 708–712.
3. С е р г е й, И. И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И. И. Сергей, А. П. Андрукевич, Е. Г. Пономаренко // *Энергетика...* (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–26.
4. С т р е л ю к, М. И. Выбор расчетных условий при проверке гибкой ошиновки РУ на электродинамическую стойкость при КЗ / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей // *Ред. Журнала «Известия вузов СССР. – Энергетика»*. – Минск, 1981. – 18 с. – Деп. в Информэнерго 01.01.1981. – № 2451. – Эн. // *РЖ: 22 Энергетика*. – 1981. – № 8. – 7Е58 ДЕП. – С. 8.
5. К а ч у р и н, В. К. Теория висячих систем / В. К. Качурин. – Л.: Госстройиздат, 1962. – 222 с.
6. Х о л я в с к и й, Г. В. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах / Г. В. Холявский. – М.: Энергия, 1971. – 156 с.
7. Д е м и д о в и ч, Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М.: Наука, 1968. – 664 с.
8. D a l l e, B. Etude du pincement d'un faisceau de sousconducteurs d'une portee de ligne lors d'un court circuit / B. Dalle // *CIGRE*. – 1982. 23–82 (WG-02) 06-IWD. – P. 1–21.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 08.08.2008

УДК 621.311.017

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТ РАЗМЫКАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ 110 кВ И ВЫШЕ

**Докт. техн. наук, проф. ФУРСАНОВ М. И., канд. техн. наук ЗОЛОТОЙ А. А.,
инженеры МАКАРЕВИЧ В. В., МУХА А. Н.**

Белорусский национальный технический университет

Одним из способов ликвидации контурных уравнительных токов является размыкание путей их протекания, т. е. размыкание контуров электрических сетей [1]. Для осуществления экономичных режимов распределительных сетей 10(6) кВ персонал электросетей ежегодно или несколько раз в год разрабатывает так называемую «нормальную» схему эксплуатации с четко установленными точками размыкания контуров и условиями работы устройств защиты и автоматики.

Задача определения оптимальных мест размыкания состоит в выделении районов электроснабжения сети от отдельных центров питания (ЦП) по минимуму принятой целевой функции Ц. В упрощенном варианте алгоритм решения данной задачи реализован в комплексе промышленных компьютерных программ для расчета и оптимизации разветвленных распределительных сетей (РС) 10(6) кВ [2, 3], который прошел успешную опытно-промышленную апробацию в электрических сетях Республики Беларусь и с учетом накопленного опыта может быть в значительной мере усовершенствован.

В частности, при оптимизации точек разрезов в распределительной сети необходимо учитывать питающую электрическую сеть 110 кВ и выше. Целевая функция Ц соответствует минимуму приведенных затрат на эксплуатацию сети и электроснабжение потребителей

$$\text{Ц} = \Delta W\beta + Y_* + F_{\text{ш}} + F_c, \quad (1)$$

где ΔW – потери электроэнергии в сети за рассматриваемый промежуток времени; β – стоимость 1 кВт·ч потерь; Y_* – ущербы (Y_w – от недоотпуска электроэнергии; Y_U – из-за неоптимальных уровней напряжения; Y_n – в связи с изменением надежности при переключениях в сети; Y_s – из-за изменения сложности эксплуатации); $F_{\text{ш}}$ – функция штрафа, учитываемая при токовой перегрузке участков сети; F_c – то же при ограничении емкостных токов замыкания на землю.

Представляя нагрузку сети ступенчатыми графиками нагрузки, составляющую $Z = \Delta W\beta$ целевой функции можно минимизировать по потерям мощности ΔP_k на каждой k -й ступени графика нагрузки продолжительностью t_k

$$Z = (\Delta P_{pk}\beta_p + \Delta P_{nk}\beta_n)t_k, \quad (2)$$

где ΔP_{pk} – потери активной мощности в распределительной сети в режиме наибольших нагрузок; β_p – стоимость потерь в сети 10(6) кВ; ΔP_{nk} – потери мощности в питающей сети; β_n – стоимость 1 кВт·ч потерь в питающей сети.

В условиях эксплуатации могут быть рекомендованы одна или несколько нормальных схем (для различных периодов года), поэтому выбор оптимального варианта может носить усредненный характер. В качестве целевой функции можно принять суммарные потери мощности в сети $\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_n$ с учетом ущерба от недоотпуска электроэнергии Y_w и функций штрафов $F_{\text{ш}}$ и F_c

$$\text{Ц} = \Delta P_p + \Delta P_n + Y_w + F_{\text{ш}} + F_c. \quad (3)$$

Составляющие Y_U , Y_n и Y_s большого влияния на результат решения не оказывают.

Потери мощности в распределительной сети ΔP_p вычисляются по формуле

$$\Delta P_p = \sum_1^l \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k} R_k, \quad (4)$$

где P_k , Q_k , U_k и R_k – соответственно активная и реактивная мощности, напряжение k -го узла и сопротивление данного участка сети; l – общее количество линий и трансформаторов сети.

Для определения величины ΔP_n разработаны авторские алгоритм и программа [4], получена специальная математическая модель, позволяющая с минимальными вычислительными затратами рассчитывать потери мощности в питающей сети в режимах, отличных от исходного.

Учет ущерба от недоотпуска электроэнергии. При оптимизации точек разрезов программа в ряде случаев предлагает отключать головные участки распределительных линий с небольшим сечением кабеля (провода) и высокой нагрузкой. Это приводит к существенному снижению надежности питания потребителей, так как нарушается секционирование схемы сети. Для решения данной проблемы на каждом шаге поиска решения предлагается производить оценку величины ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям. Настоящая задача является сложной, поэтому в алгоритме осуществлена приближенная оценка надежности различных схем питания потребителей с точностью, достаточной для решения задачи оптимизации и в абсолютном денежном выражении не оценивается.

В процессе оптимизации учитывается только основная составляющая ущерба – недоотпуск электроэнергии потребителям II и III категорий при коротких замыканиях.

Потребители I категории питаются от двух источников, поэтому зависимость этого недоотпуска от положений разрезов в сети 10(6) кВ может в существенной мере проявиться в ремонтных режимах, когда один источник питания отключен. В данной статье ремонтные схемы, а также недоотпуск энергии потребителям первой категории не рассматриваются.

На рис. 1 приведен пример участка схемы 10(6) кВ с двумя выключателями.

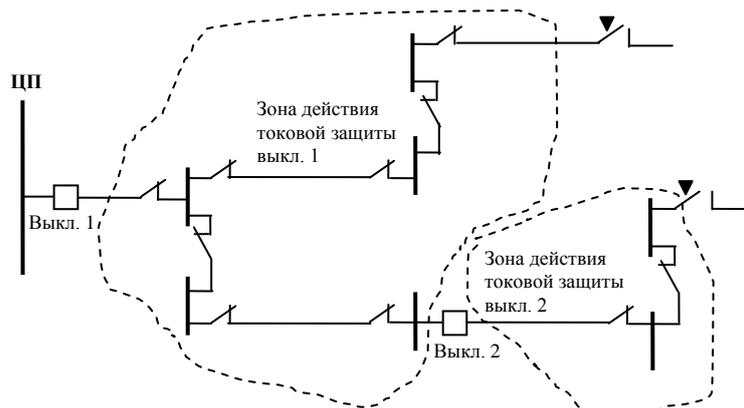


Рис. 1. Пример токовой защиты участка сети 10 кВ

При коротких замыканиях погашение потребителей в зоне действия токовой защиты 1 происходит при отключении выключателя 1, погашение потребителей в зоне 2 – при отключении выключателей 1 или 2.

Принимаем допущения:

- ущерб от погашения считаем постоянным для каждого потребителя, пренебрегая влиянием различного времени восстановления питания;
- пренебрегаем возможностью ошибочного неселективного срабатывания токовых защит;
- поток коротких замыканий, приводящих к погашению потребителей, считаем пуассоновским.

Суммарный ущерб от недоотпуска электроэнергии в схеме $Y_{\text{сум}}$ представляем в виде суммы ущербов от отключения каждой токовой защиты

$$Y_{\text{сум}} = \sum_{i=1, N_3} (Y_{zi} P_{zi}), \quad (5)$$

где N_3 – количество выключателей с токовыми защитами в сети; Y_{zi} – ущерб от одного отключения токовой защиты i ; P_{zi} – математическое ожидание числа отключений защиты i в расчетном периоде.

Ущерб от отключения защиты равен сумме ущербов от отключения потребителей в узлах, питание которых выполняется через защищенный участок, исключая узлы, питание которых резервируется АВР. Величину P_{zi} представляем в виде суммы математических ожиданий числа замыканий в защищаемых данной защитой ветвях и узлах схемы.

В этом случае величина $Y_{\text{сум}}$ определится по формуле

$$Y_{\text{сум}} = \sum_{i \in N_3} \left(\sum_{j \in N_{\text{ш}} \setminus N_{\text{ABP}i}} Y_j + \left(\sum_{k \in N_{\text{в}i}} P_{\text{кв}k} \sum_{l \in N_{\text{у}i}} P_{\text{кyl}} \right) \right), \quad (6)$$

где Y_j – ущерб от отключения потребителей в j -м узле схемы; $N_{\text{в}i}$ и $N_{\text{у}i}$ – множества индексов ветвей и узлов схемы, находящихся в зоне действия токовой защиты i (при селективной работе защиты); $P_{\text{кв}k}$ и $P_{\text{кyl}}$ – математические ожидания числа коротких замыканий в ветви k и узле l схемы соответственно; $N_{\text{ш}i}$ – множество индексов потребителей, отключаемых при срабатывании защиты i ; $N_{\text{ABP}i}$ – то же, питание которых резервируется АВР от источника, не зависящего от срабатывания токовой защиты i .

Учет возможных перегрузок линий по допустимым токам. При оптимизации точек разрезов в сети с высокой загрузкой ветвей возможна перегрузка участков сети по допустимому току нагрева проводов и кабелей. Для ввода режима в допустимую область используется штрафная функция $F_{\text{ш}}$:

$$F_{\text{ш}} = \sum_{i \in N} F_{T,j}; \quad (7)$$

$$F_{T,j} = \begin{cases} \left(\frac{I_{\text{доп}i} - I_i}{I_{\text{доп}i}} \right)^2 k_{\text{ш}}, & I_i \geq I_{\text{доп}i}; \\ 0, & I_i < I_{\text{доп}i}, \end{cases} \quad (8)$$

где I – токи участков (I_i – рабочий; $I_{\text{доп}i}$ – допустимый).

Учет емкостных токов замыкания на землю. При оптимизации точек разрезов в электрических сетях 10(6) кВ в некоторых случаях возникает необходимость ограничения емкостных токов замыкания на землю. Для этой цели в расчет введена дополнительная штрафная функция F_c

$$F_c = \sum_{i \in N_{\text{цп}}} F_{c,i}, \quad (9)$$

где $N_{\text{цп}}$ – множество индексов центров питания (ЦП), для которых вводятся ограничения по емкостному току;

$$F_{T,j} = \begin{cases} \left(\frac{I_{c \min i} - I_{ci}}{I_{c \min i}} \right)^2 k_{\text{ш.с}}, I_{ci} \leq I_{c \min i}; \\ \left(\frac{I_{c \max i} - I_{ci}}{I_{c \max i}} \right)^2 k_{\text{ш.с}}, I_{ci} \geq I_{c \max i}; \\ 0, I_{c \min i} < I_{ci} < I_{c \max i}; \end{cases} \quad (10)$$

где $I_{c \min i}$ и $I_{c \max i}$ – интервал, в котором должен находиться емкостный ток замыкания для ЦП i ; $k_{\text{ш.с}}$ – коэффициент штрафа.

Значение штрафной функции F_c корректируется на каждом шаге оптимизации.

Вычисление изменения штрафной функции для двух ближайших точек выполняется аналогично тому, как это делается для потерь мощности.

Таким образом, алгоритм позволяет учитывать потери в питающей сети 110 кВ и выше как составляющую целевой функции и большинство технических ограничений. Процедура выбора оптимальных разрезов в распределительной сети 10(6) кВ с учетом замкнутой электрической сети 110 кВ и выше работает по следующей схеме.

1. Рассчитывается режим схемы РС 10(6) кВ для исходного (неоптимизированного) состояния.

2. Известные нагрузки шин питающих подстанций 110 кВ и выше сравниваются с нагрузками секций шин, полученными в результате расчета сети 10(6) кВ. Из оптимизации исключаются разрезы в схемах, для которых полученный небаланс превышает некоторую предельную величину.

3. Случайным образом выбирается некоторый разрез в РС. Разрез перемещается на один из смежных участков, также выбираемый случайным образом. Проверяются ограничения, заданные в виде жестких запретов (метод барьеров), например требования к питанию потребителей I категории. Если ограничение нарушено, то перемещение не выполняется, повторяется настоящий пункт алгоритма.

4. Выполняется перемещение разреза в расчетной модели распределительной сети. Для данного состояния РС вычисляются изменения нагрузок на секциях питающих подстанций D_{ki} замкнутой сети по отношению к неоптимизированному состоянию распределительной сети

$$D_{ki} = S_{poi} - S_{pki}, \quad (11)$$

где S_{poi} – расчетная нагрузка на i -й секции питающих шин в исходном состоянии схемы РС; S_{pki} – то же для k -го состояния сети.

5. Определяются нагрузки S_{nki} на секциях шин питающих подстанций

$$S_{nki} = S_{noi} - D_{ki}, \quad (12)$$

где S_{noi} – известная нагрузка на i -й секции шин питающей сети в исходном состоянии схемы.

6. Для нового состояния сети вычисляются штрафные функции, соответствующие техническим ограничениям.

7. Для нового состояния схемы вычисляются потери мощности ΔP_p в распределительной сети 10(6) кВ.

8. Для нового состояния схемы с использованием созданной математической модели вычисляется значение ΔP_n .

9. Вычисляется суммарное изменение целевой функции Ц, соответствующее данному переносу разреза.

10. Если целевая функция уменьшилась, то выбранный разрез фиксируется и процедура повторяется, если нет, то перемещение разреза игнорируется и в соответствии с пунктом 3 алгоритма выбирается следующее изменение в схеме РС.

Пункты 3–10 алгоритма повторяются некоторое число раз. Затем производится проверка на минимум – каждый разрез последовательно сдвигается на смежные участки. Если найдено хотя бы одно перемещение, приводящее к улучшению целевой функции, то считается, что минимум не достигнут и процесс случайного дискретного поиска продолжается.

Особенности расчета режима и изменения потерь мощности при перемещении разрезов в распределительной сети. Разработанный алгоритм позволяет анализировать режимы разомкнутых электрических сетей 10(6) кВ с симметричной нагрузкой. Такие расчеты выполняются при заданных напряжениях центров питания, постоянных нагрузках I_j и коэффициентах мощности $\cos\varphi_j$ на стороне низшего напряжения понижающих трансформаторных подстанций (ТП) [1]. Такой способ задания режимной информации характерен для рассматриваемых электрических сетей.

Потоки мощности в сети вычисляются по номинальному напряжению с учетом потерь мощности холостого хода потребительских трансформаторов.

В исходной информации предусматривается возможность задания значений фактических замеров токов на всех трансформаторных участках сети. При этом мощности нагрузок ТП рассчитываются таким образом, чтобы ток на головном участке РЛ всегда был равен сумме токовых нагрузок трансформаторных подстанций [5].

Учитывая, что потокораспределение мощностей в сети 10(6) кВ ведется без учета потерь по номинальному напряжению, получено выражение $G_{\Delta P}(\Delta P(D_i), M, m, n)$ для вычисления изменения потерь при переходе между двумя ближайшими точками рассматриваемого пространства.

Пример преобразования схемы, соответствующий переходу между двумя ближайшими точками пространства поиска решения, дан на рис. 2.

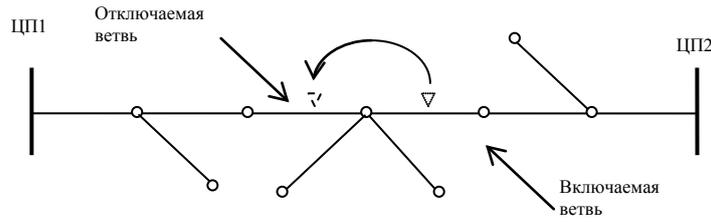


Рис. 2. Простейшее преобразование схемы при поиске решения в пространстве D

Приведенное на рис. 2 преобразование соответствует наиболее простому варианту переноса разреза, когда включаемый и отключаемый участки контура имеют общий узел. Все другие варианты переноса разреза в контуре могут быть получены в результате выполнения последовательности таких преобразований, поэтому достаточно получить выражение $G_{\Delta P}$ для данного простейшего случая.

Потери мощности в схеме в исходном состоянии

$$\Delta P = \sum_{i \in N_1} I_i^2 R_i + \sum_{j \in N_2} I_j^2 R_j + \sum_{k \in \{N \setminus N_1 \setminus N_2\}} I_k^2 R_k, \quad (13)$$

где N – множество индексов всех ветвей схемы; N_1 – множество индексов ветвей рассматриваемого контура, через которые питается узел общий узел p включаемой n и отключаемой m ветвей; N_2 – то же ветвей контура, не входящих в N_1 : $N_2 = N \setminus N_1$; I – токи ветвей, вычисленные по номинальным напряжениям, поэтому при перемещении разреза изменяются только первое и второе слагаемые. Тогда изменение потерь можно записать в следующем виде:

$$G_{\Delta P} = \left(\sum_{i \in N_1} I_i'^2 R_i + \sum_{j \in N_2} I_j'^2 R_j \right) - \left(\sum_{i \in N_1} I_i^2 R_i + \sum_{j \in N_2} I_j^2 R_j \right), \quad (14)$$

где I' – токи в ветвях контура после перемещения разреза.

Для расчета значений токов I' необходимо скорректировать исходное потокораспределение в ветвях контура:

$$\bar{S}'_i = \bar{S}_i - \bar{S}_m; \quad i \in N_1; \quad (15)$$

$$\bar{S}'_j = \bar{S}_j - \bar{S}_m; \quad j \in N_2, \quad (16)$$

где \bar{S}_m – поток отключаемой ветви в исходном режиме.

$$I_i' = \left| \bar{S}'_i \right| / (\sqrt{3} U_{\text{ном}}); \quad i \in N_1 \cup N_2. \quad (17)$$

Приведенные формулы используются для пересчета потерь мощности при поиске решения данной задачи оптимизации.

Опыт проведения эксплуатационных расчетов электрических сетей 10(6) кВ по комплексу программ [2, 3] и анализ полученных результатов показали, что значительная часть предлагаемых перемещений разрезов в РС по ряду причин реализована быть не может. Ниже проанализированы

технические ограничения, учитываемые в модифицированной модели задачи, рассмотрено их влияние на примере распределительной сети 10(6) кВ г. Минска (общее число разрезом в схеме – 1697).

Учет ущерба от недоотпуска электроэнергии, анализ возможных перегрузок линий по допустимым токам нагрева, а также обеспечение питания потребителей I категории (в г. Минске из 5055 секций 10(6) кВ ТП потребители I категории подключены к 865 секциям) описаны выше.

Запрет на переключения в абонентской сети. При оптимизации точек разрезом программой часто предлагается запитать системные трансформаторы от существующей абонентской сети, что создает определенные сложности в эксплуатации. В модифицированной модели задачи вводится запрет на осуществление подобных переключений.

Запрет на включение секционных аппаратов в ТП, отключенных по нормальной схеме. В подавляющем большинстве случаев секционные аппараты ТП с нагрузкой II категории отключены по следующим соображениям:

- для осуществления питания потребителей по двухлучевой схеме;
- для быстрого восстановления питания в случае аварии путем включения секционного аппарата на стороне 0,38 кВ в ТП, питающих ответственных потребителей.

Остальные секционные аппараты ТП включены, как правило, по нормальной схеме. В программе предусмотрен запрет на включение при оптимизации точек разрезом отключенных, по согласованию с диспетчерской службой сетей, секционных аппаратов.

Результаты вариантных оптимизационных расчетов электрической сети 10(6) кВ г. Минска с учетом и без учета принятых в модифицированной модели задачи критериев и ограничений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты вариантных оптимизационных расчетов сети 10(6) кВ г. Минска с учетом различных критериев и ограничений

Учет критериев и ограничений при оптимизации («+» – учитывается, «-» – не учитывается)						Эффект, полученный при оптимизации		
Потери мощности в сети 10(6) кВ	Потери мощности в сети 110 кВ	Недоотпуск электроэнергии	Питание потребителей I категории	Запрет переключений в абонентской сети	Запрет на включение секционных КА в ТП	Снижение потерь мощности в сети 10(6) кВ	Снижение потерь мощности в сети 110 кВ	Изменение недоотпуска, кВт·ч
+	+	+	+	+	+	669 кВт (7,74 %)	230 кВт	10833
+	-	+	+	+	+	724 кВт	-311 кВт	
+	+	+	+	+	-	1019 кВт (11,79 %)	376 кВт	13601
+	+	+	+	-	-	1243 кВт (14,37 %)	599 кВт	25107
+	+	+	-	-	-	1790 кВт (20,70 %)	928 кВт	49033
+	+	-	-	-	-	1839 кВт (21,25 %)	963 кВт	18885
-	-	-	-	-	-	2106 кВт (24,46 %)	-1108 кВт	24703

Анализ данных табл. 1 (первая и вторая строки таблицы) показывает, что при совместной оптимизации сети 10(6) и 110 кВ получается значительно больший суммарный эффект ($669 + 230 = 899$ кВт), чем только при оптимизации сети 10(6) кВ ($724 - 311 = 413$ кВт).

Поиск решения задачи оптимизации при ограничении числа перемещаемых разрывов. Основная часть схемы кабельных сетей г. Минска управляется из центрального диспетчерского пункта. По этой причине одновременное перенесение большого числа разрывов создает трудности различного характера и может привести к снижению качества получаемой электроэнергии. В связи с этим представляется целесообразным выполнять оптимизацию в несколько этапов.

Для решения задачи поэтапной оптимизации точек разрывов разработан и реализован алгоритм, позволяющий выполнить оптимизацию только указанного ограниченного количества разрывов.

Алгоритм работает по следующей схеме.

1. Последовательно для каждого разреза находится оптимальное положение в размыкаемом контуре. Фиксируется изменение целевой функции. Разрез возвращается в исходное положение.

2. Из полученного списка изменений целевой функции выбирается разрез, оптимизация которого приводит к наибольшему эффекту. Разрез переносится в оптимальное положение.

3. Пункты 1 и 2 повторяются до тех пор, пока количество перенесенных разрывов не достигнет указанного числа.

Пробные расчеты показали, что последовательное использование алгоритма для переноса ограниченного числа разрывов в конечном итоге приводит практически к такому же снижению потерь, как и алгоритм, одновременно оптимизирующий все разрывы.

Для обоснованного выбора количества перемещаемых разрывов на первом этапе оптимизации была выполнена серия оптимизационных расчетов. По результатам расчетов построена зависимость снижения потерь получаемого при оптимизации от количества перемещаемых разрывов (рис. 3).

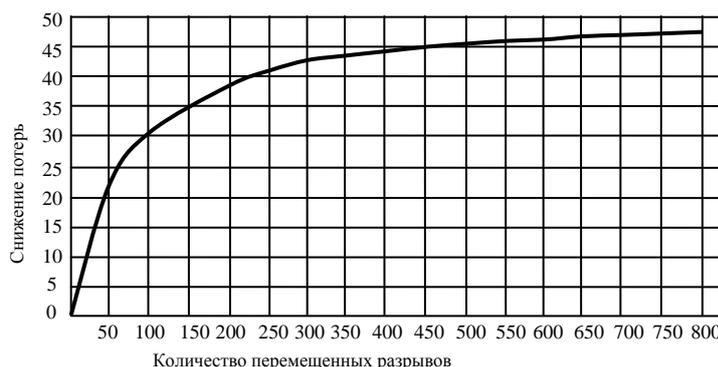


Рис. 3. Эффект от оптимизации при различном количестве перемещаемых разрывов

Из диаграммы видно, что основная часть эффекта получается при оптимизации 100–200 разрывов, что составляет 5–10 % от общего количества переносимых разрывов. Остальные разрывы находятся в положениях, близких к оптимальным.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны уточненная модель и алгоритм оптимизации точек разрывов в распределительной электрической сети 10(6) кВ с учетом питающей сети 110 кВ и выше.
2. Для определения величины потерь в питающей сети получена специальная математическая модель замкнутой сети, позволяющая осуществлять данную операцию с минимальными вычислительными затратами.
3. Предложены и проанализированы способы учета ограничений задачи: ущерба от недоотпуска электроэнергии, возможных перегрузок РЛ по допустимым токам, обеспечения питания потребителей I категории, запретов на переключения в абонентской сети и включений секционных аппаратов в ТП, отключенных по нормальной схеме.
4. Выполнены и проанализированы варианты расчетов электрической сети 10(6) кВ г. Минска с учетом и без учета принятых в модифицированной модели задачи критериев и ограничений.
5. Разработанные модифицированные модель и алгоритм положены в основу нового комплекса промышленных компьютерных программ для расчета и оптимизации разветвленных распределительных электрических сетей 10(6) кВ с несколькими источниками питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Красноярск: НПЦ КГТУ; Минск: БНТУ, 2006. – 808 с.
2. Фурсанов, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 208 с.
3. Фурсанов, М. И. Программно-вычислительный комплекс GORSR для расчета и оптимизации распределительных (городских) электрических сетей 10(6) кВ / М. И. Фурсанов, А. Н. Муха // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 3. – С. 34–39.
4. Фурсанов, М. И. Алгоритм и программа расчета установившихся режимов основных электрических сетей энергосистем / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // Вестник БГПА. – 2002. – № 1. – С. 60–63.
5. Фурсанов, М. И. Оценка и анализ режимов и потерь электроэнергии в электрических сетях 6–20 кВ на основе программно-вычислительного комплекса «Дельта» / М. И. Фурсанов, О. А. Жерко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 1. – С. 31–43.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 08.08.2008