

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 35 КВ И ВЫШЕ

БАНДУРИН И.И.

Предлагается усовершенствованная методика, позволяющая создать рациональную систему оперативного обслуживания электрических сетей 35 кВ и выше, выполняющую с минимальными затратами все требования: а) в среднем; б) с заданным средним временем обслуживания; в) с заданной вероятностью обслуживания и надежностью выполнения.

1. Введение

Рыночные условия и снижение надежности стареющего электросетевого оборудования ведут к повышению риска возникновения технологических нарушений работы как на подстанциях (ПС), так и на линиях электропередач, к росту расходов на поддержание требуемого уровня надежности в распределительном электросетевом комплексе. Поэтому обеспечение надежной работы электроэнергетических систем является одной из важнейших задач современной электроэнергетики. Решение этой задачи зависит от правильного подхода к организации оперативного обслуживания (ОО) электрооборудования, от совершенства методов обоснованного принятия решений по ОО.

В [1-4] представлены методики оптимизации системы ОО электрических сетей (ЭС) 35-110 кВ по критерию минимальных затрат при обслуживании всех требований: а) в среднем; б) с заданным средним временем обслуживания. В [5] показано, что математические модели, которые обслуживают требования в среднем и с заданным средним временем, являются частным случаем модели, обслуживающей требования с заданной вероятностью и надежностью выполнения. Методику оптимизации системы ОО представляется возможным распространить на ЭС 110 кВ и выше. Таким образом, целью работы является совершенствование методики оптимизации системы ОО ЭС 35 кВ и выше по критерию минимальных затрат.

2. Методика оптимизации системы оперативного обслуживания электрических сетей

В систему ОО поступают требования (заявки) со стороны ЭС. Поток требований распределяется между обслуживающими приборами. Обслуживающими приборами ПС 35 кВ и выше являются устройства телемеханики и автоматики (ТМиА), а также оперативный персонал. В методике рассматривается четыре типа обслуживающих приборов:

1) дежурство одного электромонтера (ДЭ) на ПС в смене;

2) дежурство одного электромонтера на дому (ДЭ на дому) в смене;

3) обслуживание ПС с помощью оперативно-выездной бригады (ОВБ);

4) обслуживание ПС с помощью устройств ТМиА.

Различные варианты организации системы ОО ПС получаются с помощью линейной комбинации из четырех обслуживающих приборов. На возможные комбинации вариантов организации системы ОО ПС накладывается ограничение на вид ОО. Одну и ту же ПС не могут обслуживать ДЭ, ДЭ на дому и ОВБ одновременно. Данное ограничение следует из практики ОО.

Все условные обозначения, принимаемые в оптимизационной модели, сведены в табл. 1–6. В табл. 1 приведены индексы, используемые в моделях; в табл. 2 – переменные математической модели; в табл. 3 – исходные данные; в табл. 4 – расчетные данные; в табл. 5 – составляющие целевой функции; в табл. 6 – ограничения целевой функции.

Таблица 1

| | |
|-----------------------------|---|
| $i=1,2,\dots,n_{\text{тп}}$ | i – номер требования на ПС, $n_{\text{тп}}$ – количество всех обслуживаемых требований на i -й ПС |
| $i=1,2,\dots,n$ | i – номер ПС, n – количество всех обслуживаемых ПС |
| $j=1,2,\dots,m$ | j – номер ОВБ, m – количество ОВБ на всех базах |
| $k=1,2,\dots,p$ | k – номер базы, p – количество всех баз |

Таблица 2

| | |
|---|---|
| Основные переменные показывают требования, выполняемые обслуживающим прибором | |
| $\xi_{\text{ДЭ}_{i,l}}$ | $\begin{cases} 1, \text{ если } l\text{-е требование выполняется;} \\ \text{ДЭ на } i\text{-й ПС;} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$ |
| $\xi_{\text{ДЭ_на_дому}_{i,l}}$ | $\begin{cases} 1, \text{ если } l\text{-е требование выполняется;} \\ \text{ДЭ на дому на } i\text{-й ПС;} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$ |
| $\xi_{\text{ОВБ}_{j,l}}$ | $\begin{cases} 1, \text{ если } l\text{-е требование выполняется;} \\ j\text{-й бригадой ОВБ на } i\text{-й ПС;} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$ |
| $\xi_{\text{ТМиА}_{i,l}}$ | $\begin{cases} 1, \text{ если } l\text{-е требование выполняется;} \\ \text{устройством ТМиА на } i\text{-й ПС;} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$ |
| Зависимые переменные показывают количество требований, выполняемых обслуживающим прибором | |
| $n_{\text{ДЭ}_i}$ | $\sum_{l=1}^{n_{\text{тп}}} \xi_{\text{ДЭ}_{i,l}}$ |
| $n_{\text{ДЭ_на_дому}_i}$ | $\sum_{l=1}^{n_{\text{тп}}} \xi_{\text{ДЭ_на_дому}_{i,l}}$ |
| $n_{\text{ОВБ}_{j,i}}$ | $\sum_{l=1}^{n_{\text{тп}}} \xi_{\text{ОВБ}_{j,l}}$ |
| $n_{\text{ТМиА}_i}$ | $\sum_{l=1}^{n_{\text{тп}}} \xi_{\text{ТМиА}_{i,l}}$ |

Продолжение табл. 2

| | |
|--|--|
| Индикаторные переменные показывают места расположения обслуживающих приборов | |
| $x_{ДЭ_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{ДЭ_i} > 0; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$ | |
| $x_{ДЭ_на_дому_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{ДЭ_на_дому_i} > 0; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$ | |
| $x_{ОВБ_{i,j}} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{ОВБ_{i,j}} > 0; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$ | |
| $x_{ТМИА_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{ТМИА_i} > 0; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$ | |
| $y_j = \begin{cases} 1, & \text{если хотя бы одна } x_{ОВБ_{i,j}} > 0; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$ | |
| $z_k = \begin{cases} 1, & \text{если хотя бы одна } y_j > 1, \text{ где } j \in k; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$ | |

Таблица 3

| Обозначение | Комментарий | |
|--|---|--|
| Параметры обслуживания | | |
| $\lambda_{i,1}$ | Интенсивность обслуживания 1-го требования на i-й ПС | ч ⁻¹ |
| $\lambda_{ДЭ}$ | Интенсивность отказов ОП ДЭ, ДЭ на дому и ОВБ | ч ⁻¹ |
| $\lambda_{ТМИА}$ | Интенсивность отказов ОП ТМИА | ч ⁻¹ |
| $t_{ДЭ_{i,1}}$ | Время обслуживания ДЭ 1-го требования на i-й ПС | ч |
| $t_{дост_{i,j}}$ | Время доставки j-й бригады ОВБ с базы на i-ю ПС | ч |
| $t_{пр_i}$ | Время прибытия ДЭ на дому на i-ю ПС | ч |
| $t_{ТМИА_{i,1}}$ | Время обслуживания устройством ТМИА 1-го требования на i-й ПС | ч |
| b_k | Максимально возможное количество бригад ОВБ k-й на базе | – |
| $P_{i,1}$ | Мощность 1-го требования на i-й ПС | кВт |
| $c_{уд_{i,1}}$ | Удельный ущерб 1-го требования на i-й ПС | $\frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ |
| Требования к системе | | |
| $p_{тр}$ | Вероятность обслуживания требования | % |
| t_{max} | Максимально допустимое время обслуживания | ч |
| R_{min} | Требуемый уровень надежности обслуживания требования | – |
| Ежемесячные затраты на обслуживание требований при их выполнении | | |
| $Z_{ДЭ}$ | ДЭ | руб |
| $Z_{ДЭ_на_дому}$ | ДЭ на дому | руб |

Продолжение табл. 3

| | | |
|---|---|-------------------------------|
| $Z_{ОВБ}$ | ОВБ | руб |
| $Z_{iч}$ | Затраты на 1 час работы машины ОВБ | $\frac{\text{руб}}{\text{ч}}$ |
| Дисконтированные затраты, приведенные к одному месяцу, на создание обслуживающего прибора | | |
| $K_{ДЭ_i}$ | ДЭ на i-й ПС | руб |
| $K_{ДЭ_на_дому_i}$ | ДЭ на дому на i-й ПС | руб |
| $K_{ОВБ_j}$ | j-й бригады ОВБ | руб |
| c_k | k-й базы для бригад ОВБ | руб |
| $K_{1треб_{i,1}}$ | устройства ТМИА для 1-го требования на i-й ПС | руб |
| $K_{ТМ_i}$ | системы телемеханики на i-й ПС | руб |

Таблица 4

| № | Комментарий и формула |
|---|--|
| 1 | Максимально допустимое время обслуживания |
| | $t_{об\max} = \min \left(\left(-\frac{t_{зад}}{\ln(1-p_{тр})} \right), \left(-\frac{\ln R_{min}}{\lambda_{ДЭ}} \right) \right)$ |
| 2 | Среднее время обслуживания требования |
| | $t_{ДЭ_i} = \frac{\sum_{n_{тр_i}}^{n_{тр_i}} t_{ДЭ_{i,1}}}{n_{тр_i}};$ |
| | $t_{ДЭ_на_дому_i} = \frac{\sum_{n_{тр_i}}^{n_{тр_i}} t_{ДЭ_на_дому_{i,1}}}{n_{тр_i}};$ |
| 3 | Время ожидания требования в очереди |
| | $t_{очДЭ_{i,1}} = \frac{\lambda_{i,1} t_{ДЭ_{i,1}}^2}{1 - \lambda_{i,1} t_{ДЭ_{i,1}}};$ |
| | $t_{очДЭ_на_дому_{i,1}} = \frac{\lambda_{i,1} t_{ДЭ_на_дому_{i,1}}^2}{1 - \lambda_{i,1} t_{ДЭ_на_дому_{i,1}}};$ |
| | $t_{очОВБ_{i,j,1}} = \frac{\lambda_{i,1} t_{ОВБ_{i,j,1}}^2}{1 - \lambda_{i,1} t_{ОВБ_{i,j,1}}};$ |
| | $t_{очТМИА_{i,1}} = \frac{\lambda_{i,1} t_{ТМИА_{i,1}}^2}{1 - \lambda_{i,1} t_{ТМИА_{i,1}}};$ |

3. Методика нахождения рационального вида системы ОО ЭС 35 кВ и выше

1. Определяем количество обслуживающих приборов для моделирования по формуле

$$n_{оп} = ОКРВВЕРХ \left(\frac{t_{оп}}{t_{об\max}} + t_{оп} \sum_{i=1}^n \lambda_i \right),$$

где ОКРВВЕРХ – функция, которая округляет число до ближайшего по модулю большего целого; $t_{оп}$ – среднее время обслуживания одного требования обслуживающим прибором, ч.

2. Записываем целевую функцию (табл. 5) и ее ограничения (табл. 6) для конкретной задачи.

3. Приводим целевую функцию и ограничения к следующему виду:

целевая функция: $f^T x \rightarrow \min$, ограничения

$$\begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \\ \mathbf{Aeq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{beq}, \\ \mathbf{x} \text{ бинарный.} \end{cases}$$

где \mathbf{f} – n-мерный вектор коэффициентов целевой функции; \mathbf{b} и \mathbf{beq} – m-мерные векторы правых частей ограничений; \mathbf{A} и \mathbf{Aeq} – матрицы размера $m \times n$, содержащие коэффициенты левых частей ограничений; \mathbf{x} – n-мерный вектор переменных, который является бинарным (двоичным), т.е. его элементами могут быть числа, которые принимают значения 0 либо 1.

4. Решение \mathbf{x} получаем методами булева линейного программирования (метод ветвей и границ, метод отсекающих плоскостей). Для нахождения решения \mathbf{x} с помощью ЭВМ можно использовать стандартные математические пакеты, например, такие как MS Excel и Matlab. Для этого в программе Matlab нужно применять функцию `bintprog` [6].

Таблица 5

| № | Составляющие целевой функции |
|---|--|
| 1 | Затраты на обслуживание требований |
| | $3_{дэ} \sum_{i=1}^n x_{дэ_i} + 3_{дэ_на_дому} \sum_{i=1}^n x_{дэ_на_дому_i} + 3_{овб} \sum_{j=1}^m y_j$ |
| 2 | Затраты на доставку бригад ОВБ на ПС |
| | $14403_{\text{час}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} t_{\text{достав}_i,j} x_{овб_{i,j}}$ |
| 3 | Затраты на создание обслуживающих приборов |
| | $\sum_{i=1}^n K_{дэ_i} x_{дэ_i} + \sum_{i=1}^n K_{дэ_на_дому_i} x_{дэ_на_дому_i} + \sum_{j=1}^m K_{овб_j} y_j + \sum_{k=1}^p c_k z_k + \sum_{i=1}^n K_{ТМ_i} x_{ТМ_{иA}_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{n_{тр_i}} K_{\text{треб}_{i,l}} \xi_{ТМ_{иA}_{i,l}}$ |
| 4 | Затраты на оплату ущерба потребителям электроэнергии |
| | $720 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} c_{уд_{i,l}} P_{i,l} \times \left((t_{дэ_{i,l}} + t_{очдэ_{i,l}}) \xi_{дэ_{i,l}} + (t_{дэ_на_дому_{i,l}} + t_{очдэ_на_дому_{i,l}}) \xi_{дэ_на_дому_{i,l}} + (t_{овб_{i,j,l}} + t_{очовб_{i,j,l}}) \xi_{овб_{i,j,l}} + (t_{ТМ_{иA}_{i,l}} + t_{очТМ_{иA}_{i,l}}) \xi_{ТМ_{иA}_{i,l}} \right)$ |

| № | Ограничения: |
|---|---|
| 1 | на значения переменных |
| a | $\xi_{дэ_{i,l}}, \xi_{дэ_на_дому_{i,l}}, \xi_{овб_{i,j,l}}, \xi_{ТМ_{иA}_{i,l}}, x_{дэ_i}, x_{дэ_на_дому_i}, x_{овб_{i,j}}, x_{ТМ_{иA}_i}, y_j, z_k$ – двоичные переменные |
| б | $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \xi_{дэ_{i,l}} \geq x_{дэ_i}, x_{дэ_i} \geq \xi_{дэ_{i,l}};$ $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \xi_{дэ_на_дому_{i,l}} \geq x_{дэ_на_дому_i};$ $x_{дэ_на_дому_i} \geq \xi_{дэ_на_дому_{i,l}};$ $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \xi_{овб_{i,j,l}} \geq x_{овб_{i,j}}, x_{овб_{i,j}} \geq \xi_{овб_{i,j,l}};$ $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \xi_{ТМ_{иA}_{i,l}} \geq x_{ТМ_{иA}_i}, x_{ТМ_{иA}_i} \geq \xi_{ТМ_{иA}_{i,l}};$ $\sum_{i=1}^n x_{овб_{i,j}} \geq y_j, y_j \geq x_{овб_{i,j}};$ $\sum_{j=b_{k-1}+1}^{b_k} y_j \geq z_k, z_k \geq y_j, j \in k$ |
| | 2 |
| | $(t_{дэ_{i,l}} + t_{очдэ_{i,l}}) \xi_{дэ_{i,l}} + (t_{дэ_на_дому_{i,l}} + t_{очдэ_на_дому_{i,l}}) \xi_{дэ_на_дому_{i,l}} + (t_{овб_{i,j,l}} + t_{очовб_{i,j,l}}) \xi_{овб_{i,j,l}} + (t_{ТМ_{иA}_{i,l}} + t_{очТМ_{иA}_{i,l}}) \xi_{ТМ_{иA}_{i,l}} \leq t_{об\max}$ |
| 3 | на загрузку обслуживающего прибора при обслуживании требований: |
| a | в среднем |
| | $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} t_{дэ_{i,l}} \xi_{дэ_{i,l}} \leq 0,5;$ $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} t_{дэ_на_дому_{i,l}} \xi_{дэ_на_дому_{i,l}} \leq 0,5;$ $\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} t_{овб_{i,j,l}} \xi_{овб_{i,j,l}} \leq 0,5;$ |
| б | с заданным средним временем обслуживания |
| | $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} \xi_{дэ_{i,l}} \leq \frac{1}{t_{дэ_i}} - \frac{1}{t_{\max}};$ $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} \xi_{дэ_на_дому_{i,l}} \leq \frac{1}{t_{дэ_на_дому_i}} - \frac{1}{t_{\max}};$ $\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} \xi_{овб_{i,j,l}} \leq \frac{1}{t_{овб_{i,j}}} - \frac{1}{t_{\max}};$ |
| в | с заданной вероятностью обслуживания и надежностью выполнения |
| | $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} \xi_{дэ_{i,l}} \leq \frac{1}{t_{дэ_i}} - \frac{1}{t_{об\max}};$ $\sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} \xi_{дэ_на_дому_{i,l}} \leq \frac{1}{t_{дэ_на_дому_i}} - \frac{1}{t_{об\max}};$ $\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{n_{тр_i}} \lambda_{i,l} \xi_{овб_{i,j,l}} \leq \frac{1}{t_{овб_{i,j}}} - \frac{1}{t_{об\max}};$ |
| 4 | на вид ОО |
| a | $\xi_{дэ_{i,l}} + \xi_{дэ_на_дому_{i,l}} + \xi_{овб_{i,j,l}} + \xi_{ТМ_{иA}_{i,l}} = 1$ |
| б | $x_{дэ_i} + x_{дэ_на_дому_i} + x_{овб_{i,j}} \leq 1$ |

Выводы

Разработана методика, позволяющая создать рациональную систему ОО ЭС 35кВ и выше, обслуживающую с минимальными затратами все требования: а) в среднем; б) с заданным средним временем обслуживания; в) с заданной вероятностью обслуживания и надежностью выполнения.

Литература: 1. Бандурин И.И. Математические модели оптимальной структуры оперативного обслуживания электрических сетей / И.И. Бандурин, А. П. Васильев // Вестник ИГЭУ. 2010. №2. С. 47-53. 2. Бандурин И.И. Оптимизация структуры оперативного обслуживания электрических сетей / И.И. Бандурин, А.П. Васильев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2010. №10. С. 71-75. 3. Бандурин И.И. Управление структурой оперативного обслуживания электрических сетей / Управление большими системами. Специальный выпуск 30.1 "Сетевые модели в управлении": сб. ст. М.: ИПУ РАН, 2010. С.252- 273. 4. Бандурин И.И. Математическая модель, позволяющая построить систему оперативного

обслуживания электрических сетей 35-110 кВ с заданным средним временем обслуживания// Состояние и перспективы развития электротехнологии: Сб. науч. труд. ИГЭУ, Иваново, 2011. С. 110-112. 5. Бандурин И.И. Совершенствование системы оперативного обслуживания электрических сетей 35-110 кВ. Дис. ... канд. техн. наук / И.И. Бандурин ; Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново, 2011. С. 60–65. 6. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов // СПб.: Питер, 2001. 480 с.

Поступила в редколлегию 14.08.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Тевяшев А.Д.

Бандурин Иван Иванович, канд. техн. наук, ассистент кафедры «Теоретические основы электротехники» Псковского государственного университета. Научные интересы: АСУ ТП в электроэнергетике, надежность больших систем энергетики. Увлечения и хобби: шахматы, фитнес. Адрес: Россия, 180760, Псков, пл. Ленина, 2, тел. +7-(8112)-55-56-61 (дом), +7-905-295-07-74 (моб).