

Раздел 1. ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕКОНСТРУКЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Составление возможных вариантов структурной схемы подстанции выполняют на основании следующих данных: назначение подстанции в электросети; перетоков мощности через нее, наличия РУ повышенных напряжений и числа трансформаторов.

Для резервирования питания потребителей первой и второй категорий в сетях среднего и низшего напряжений имеются вторые источники питания, при этом для потребителей первой категории обеспечен автоматический ввод резерва.

При установке на подстанции более одного трансформатора (в общем случае n_T) расчетным является случай отказа одного из трансформаторов, когда оставшиеся в работе трансформаторы с учетом их максимальной нагрузки должны передать всю необходимую мощность. В современных условиях, когда аварийный резерв мощных трансформаторов в сетях практически отсутствует, а перегрузочная способность трансформаторов определяется заводом изготовителем [2], номинальную мощность трансформатора целесообразно в общем виде выбирать по выражению

$$S_{T.ном} \geq \frac{P_{max}}{K_{п.ав} \cos\varphi(n_T - 1)},$$

где P_{max} – активная максимальная нагрузка подстанции, МВ·А; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности нагрузки; $K_{п.ав}$ – коэффициент аварийной перегрузки трансформаторов ($K_{п.ав} = 1,3$).

Номинальная мощность трансформатора может быть определена с учетом допустимых производителем систематических перегрузок, в зависимости от графика нагрузки, системы охлаждения и климатического исполнения.

Отбор конкурирующих вариантов схем подстанций производят на основе их технико-экономического сопоставления по критерию минимума приведенных затрат [3].

Выбор способа ограничения токов КЗ на подстанции необходим для снижения токов КЗ до допустимых уровней как на подстанции, так и у потребителей.

Допустимый ток КЗ на подстанции определяется параметрами выключателей КРУ, а также термической стойкостью кабельных линий и параметрами выключателей, устанавливаемых на распределительных подстанциях (РП).

Для эффективного ограничения токов КЗ применяют следующие способы:

- 1) раздельная работа трансформаторов на стороне НН; он не требует дополнительных затрат;
- 2) применение трансформаторов с расщепленными обмотками НН;
- 3) установка токоограничивающих реакторов (одинарных или сдвоенных) в цепях трансформаторов;
- 4) схема с линейными групповыми или индивидуальными реакторами.

На мощных подстанциях может потребоваться сочетание всех средств ограничения токов КЗ. Если на подстанции установлены синхронные компенсаторы СК, то отдают предпочтение их симметричному присоединению.

Задача 1.1. Выбрать структурную схему подстанции. Понижительная подстанция на напряжении 110 кВ подключается к системе ($S_c = 2000$ МВ·А; $x_c = 1,0$ о.е.) двухцепной линией длиной 50 км. Удельное сопротивление * линии $x_0 = 0,4$ Ом/км. Подстанция имеет двухступенчатый график нагрузок.

Подстанция на напряжении 10,5 кВ питает потребителей 1-й и 2-й категории через 8 РП. Нагрузка каждой РП составляет 4,5 МВт, $\cos\varphi = 0,85$. $P_{\max} = 42$ МВт; $P_{\min} = 25$ МВт.

Для питания каждой РП предусмотрены 2 кабельные линии с алюминиевыми жилами сечением $S_k = 150$ мм² и длиной 1,5 км.

На РП установлены выключатели типа ВМП-10К ($I_{отк} = 20$ кА). Минимальное сечение кабелей с алюминиевыми жилами, отходящими от РП, составляет $S_k = 50$ мм².

Полное время отключения линий (время РЗ и полное время отключения выключателя), присоединенных к шинам подстанции, составляет $t_{отк1} = 1,1$ с. Время отключения линий, отходящих от РП, равно $t_{отк2} = 0,6$ с.

Решение

Выбираем трансформаторы подстанции.

Поскольку потребители подстанции относятся к I и II категории, то необходима установка двух трансформаторов.

Мощность трансформатора выбирается в соответствии с формулой

$$S_{T.НОМ} \geq \frac{P_{\max}}{K_{П.ав} (n_T - 1) \cos \varphi} = \frac{42}{1,3 \cdot 0,85} = 38 \text{ МВ} \cdot \text{А} .$$

Выбираем трансформатор типа ТД-40000 ($U_K = 10,5 \%$), при этом коэффициент предварительной нагрузки

$$K_1 = \frac{P_{\min}}{S_{T.НОМ} \cos \varphi} = \frac{25}{40 \cdot 0,85} = 0,735.$$

Задача 1.2. Способы ограничения токов КЗ на подстанции. Ток КЗ на подстанции должен быть снижен до значения, не превышающего заданные уровни:

ток термической стойкости головных кабелей, отходящих от сборных шин [3]

$$I_{\text{тер}1} = \frac{c \cdot S_1 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t_{\text{отк}1} + T_{a1}}} = \frac{100 \cdot 150 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1,1 + 0,05}} = 14,9 \text{ кА},$$

где $T_{a1} = 0,05$ с [2]; а коэффициент c – функция, значения которой определены по табл. 4.2 [2];

ток термической стойкости кабеля минимального сечения, отходящего от шин РП

$$I_{\text{тер}2} = \frac{100 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{0,6 + 0,01}} = 6,4 \text{ кА} ,$$

где $T_{a2} = 0,01$ с.

Таким образом, допустимый ток КЗ для подстанции равен $I_{K1\text{доп}} = 14,0$ кА, а для распределительной сети $I_{K2\text{доп}} = 6,4$ кА.

а) Расчет токов КЗ на подстанции без ТОУ (выключатель СВ включен).

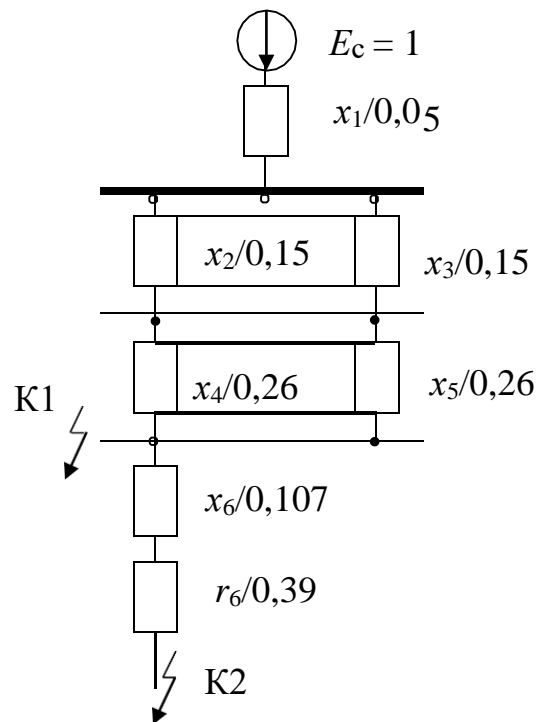
Расчет токов КЗ проводится при КЗ на сборных шинах подстанции 10 кВ, а также в начале кабеля питающей сети РП.

Расчет проводим в о.е. при приближенном учете коэффициентов трансформации.

Базовые условия: $S_6 = 100$ МВ·А;

$$U_{6I} = 10,5 \text{ кВ}; U_{6II} = 115 \text{ кВ};$$

$$I_{6I} = S_6 / (\sqrt{3} U_{6I}) = 100 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 5,5 \text{ кВ}.$$



Рассчитываем индуктивное сопротивление элементов схемы замещения в системе о.е.

$$x_{1(б)}^* = x_6 \frac{S_6}{S_{ном}} = 1,0 \frac{100}{2000} = 0,05 .$$

Ниже опускаем индексы * и (б).

$$x_2 = x_3 = x_0 \cdot l \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 0,4 \cdot 50 \frac{100}{115^2} = 0,151 ;$$

$$x_4 = x_5 = \frac{U_k \%}{100} \frac{S_6}{S_{T,ном}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 40} = 0,262 ;$$

$$x_6 = 0,079 \cdot 1,5 \frac{100}{10,5^2} = 0,107 ; \quad r_6 = 0,286 \cdot 1,5 \frac{100}{10,5^2} = 0,39 ;$$

$$x_7 = x_1 + x_2 / 2 + x_4 / 2 = 0,05 + \frac{0,151}{2} + \frac{0,262}{2} = 0,255 .$$

ЭДС системы $E_c = 1,0$: поэтому ток в точке K1 равен

*

$$I_{\text{по,К1}} = \frac{I_{\text{б1}}}{x_4} = \frac{5,5}{0,85} = 21,6 \text{ кА}; I_{\text{по,К1}} > I_{\text{К1доп}} = 14 \text{ кА} .$$

Ток КЗ в точке К2 определяем с учетом активного сопротивления кабеля

$$x_8 = x_7 + x_6 = 0,256 + 0,197 = 0,363;$$

$$z_8 = \sqrt{x_8^2 + r_8^2} = \sqrt{0,368^2 + 0,39^2} = 0,533;$$

$$I_{\text{по,К2}} = \frac{5,5}{0,533} = 10,3 \text{ кА}; I_{\text{по,К2}} > I_{\text{К2доп}} = 6,40 \text{ кА} .$$

Токи КЗ в точках К1 и К2 превышают допустимые значения, поэтому на подстанции необходимо предусмотреть ограничение тока КЗ.

б) Раздельная работа трансформаторов.

При раздельной работе трансформаторов ТД-40000/110 (выключатель СВ отключен), результирующие значения сопротивлений схемы замещения для точек К1 и К2 соответственно равны:

$$x_7 = x_1 + \frac{x_3}{2} + x_4 = 0,05 + \frac{0,151}{2} + 0,26 = 0,385 ;$$

$$x_8 = x_7 + x_6 = 0,385 + 0,107 = 0,492;$$

$$z_8 = \sqrt{0,492^2 + 0,39^2} = 0,627.$$

При этом токи КЗ:

$$I_{\text{по,К1}} = \frac{5,5}{0,385} = 14,3 \text{ кА}; I_{\text{по,К1}} > I_{\text{К1доп}} = 14,0 \text{ кА};$$

$$I_{\text{по,К2}} = \frac{5,5}{0,627} = 8,8 \text{ кА}; I_{\text{по,К2}} > I_{\text{К2доп}} = 6,40 \text{ кА}.$$

Ограничение тока КЗ при раздельной работе трансформаторов недостаточно как для оборудования подстанции, так и для распределительной сети.

в) Использование трансформаторов с расщепленными обмотками НН. Для новых условий выбираем трансформатор ТРДН-40000/110. Схема замещения такого трансформатора имеет вид трехлучевой звезды.

Сопротивление луча, обращенного к зажиму высшего напряжения невелико и составляет $x_{\text{в}} = 0,125 x_{\text{т}}$, а сопротивление двух других в 1,75 раза

больше относительного сопротивления двухобмоточного трансформатора той же мощности и того же U_H ($x_{H1} = x_{H2} = 1,75 x_T$):

$$x_{H1} = x_{H2} = 1,75 \cdot 0,262 = 0,454;$$

$$x_B = 0,125 \cdot 0,262 = 0,032;$$

$$x_4 = x_B + x_{H1} = 0,032 + 0,454 = 0,486.$$

Результирующие значения сопротивлений схемы замещения равны:

$$x_7 = x_1 + \frac{x_2}{2} + x_4 = 0,611;$$

$$z_8 = \sqrt{0,718^2 + 0,39^2} = 0,817.$$

Следовательно:

$$I_{\text{по,К1}} = \frac{5,5}{0,611} = 9,0 \quad \text{кА}; \quad I_{\text{по,К1}} < I_{\text{К1 доп}} = 14,0 \text{кА};$$

$$I_{\text{по,К2}} = \frac{5,5}{0,817} = 6,73 \quad \text{кА}; \quad I_{\text{по,К2}} > I_{\text{К2 доп}} = 6,40 \text{кА}.$$

Расчет показывает, что использование трансформаторов с расщепленными обмотками НН является приемлемым для условий токоограничения на подстанции, однако для условий РП токоограничение неудовлетворительно.

г) Установка токоограничивающих реакторов в цепях трансформаторов.

Рассмотрим установку сдвоенного реактора в цепь трансформатора. Ток утяжеленного рабочего режима $I_{\text{утж}}$, который необходим для выбора номинального тока реактора $I_{\text{р.ном}}$, определен при условии отключения одного из трансформаторов

$$I_{\text{утж}} = \frac{38 \cdot 10^3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 1039 \text{ А}.$$

Определим сопротивление реактора в относительных базовых единицах по условию ограничения тока КЗ на подстанции. Схема замещения имеет последовательные элементы: $E_{сэ}^* = 1$ и $x_{сэ}^* = I_{\text{Г}} / I_{\text{по,К1}}$. При отдельной работе трансформаторов $x_{сэ}^* = x_7$.

Для точки К1 имеем

$$x_{p*} = \frac{I_6}{I_{K2\text{доп}}} - x_c = \frac{5,5}{14,0} - 0,385 = 0,008,$$

а для точки К2

$$x_{p*} = \sqrt{\left(\frac{I_6}{I_{K2\text{доп}}}\right)^2 - r_6^2} \cdot x_c - x_6 =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{5,5}{6,4}\right)^2 - 0,39^2} - 0,107 - 0,385 = 0,274.$$

Расчетным является большее значение, которое в омах составляет

$$x_p = x_{p*} \frac{U_{6I}^2}{S_6} = \frac{0,274 \cdot 10,5^2}{100} = 0,287 \text{ Ом}.$$

Возможна установка реактора РБАС-2×1600-0,35, имеющего коэффициент связи $K_{св} = 0,51$.

Рассчитываем ток КЗ в точках К1 и К2 с учетом сопротивления выбранного реактора:

$$x'_7 = 0,385 + 0,32 = 0,705; \quad I_{\text{по,К1}} = \frac{5,5}{0,705} = 7,8 \text{ кА} < I_{K1\text{доп}} = 14 \text{ кА};$$

$$z_8 = \sqrt{(x_7 + x_p)^2 + r_6^2}; \quad I_{\text{по,К2}} = \frac{5,5}{1,07} = 5,14 \text{ кА} < I_{K2\text{доп}} = 6,4 \text{ кА}.$$

Проверяем выбранный ректор по потере U в нормальном режиме работы, а также на термическую и электродинамическую стойкость к току КЗ за реактором (точка К1).

Согласно [2]

$$\Delta U_p = \frac{\sqrt{3} x_p}{U_{\text{ном}}} 100 \cdot I_{\text{утж}} \cdot \sin \varphi (1 - K_{св}) =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 0,35}{10,5 \cdot 10^3} 100 \cdot 1039 \cdot 0,6 \cdot 0,49 = 1,76 \%,$$

что находится в пределах допустимого значения, равного 1,5–2 %.

Для выбранного реактора

$$i_{\text{дин}} = 29 \text{ кА}; \quad I_{\text{тер}} = 11,4 \text{ кА}; \quad t_{\text{тер}} = 8 \text{ с}.$$

Реактор удовлетворяет требованиям термической и электродинамической стойкости, если

$$i_{уд} \leq i_{дин} ; B \leq I_{тер}^2 t_{тер} .$$

Ударный ток в точке К1

$$i_{уд} = 1,8 \cdot 2 \cdot 7,8 = 19,86 \text{ кА}.$$

Величину импульса квадратичного тока рассчитываем по

$$B = I_{по,К1}^2 (t_{отк} + T_a) = 7,8^2 (1,1 + 0,05) = 70 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} .$$

Так как B меньше $I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 11,4^2 \cdot 8 = 1039 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$, то реактор удовлетворяет требованию термической стойкости.

Результаты сведены в таблицу.

Сводная таблица расчетов

Ток в расчетной точке КЗ	Способы ограничения тока КЗ				Ток термической стойкости кабеля, кА
	Без ТОУ	Раздельная работа трансформаторов	Раздельная работа трансформатора с расщепленной обмоткой	Токоограничивающий реактор	
$I_{К1}$, кА	21,6	14,3	9,0	7,8	14,0
$I_{К2}$, кА	10,3	8,8	6,73	5,14	6,40

