

1 ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

1.1 НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В большинстве электрических сетей применяется переменный ток, в связи с его существенными преимуществами перед постоянным. К ним можно отнести:

- Отсутствие необходимости его выпрямления, так как генераторы вырабатывают переменный ток, и для его выпрямления требуются механический (коллектор) или диодный выпрямитель.
- Легкость преобразования уровня напряжения с помощью трансформаторов. Это дает возможность использовать для передачи электроэнергии высокие напряжения, при которых потери на ее транспорт меньше, а в местах использования – низкое напряжение, на котором токоприемники становятся проще и дешевле.

Такая электрическая сеть выглядит следующим образом:

Генератор напряжением 3-24 кВ в зависимости от мощности, повышающий трансформатор и линия электропередачи напряжением до 750 кВ, в зависимости от передаваемой мощности. На приемном конце – трансформатор, понижающий напряжение до величины, удобной для электроприемников: 10-0,4 кВ. Зачастую перед потреблением происходит несколько ступеней трансформации напряжения – появляются промежуточные трансформаторные подстанции.

Электрические сети могут быть однофазные и трехфазные. Однофазные сети состоят из прямого и обратного провода, т.е. для передачи электроэнергии требуется обязательно 2 провода. Трехфазная сеть состоит из трех проводов и таким образом обратный провод отсутствует. Так как в трехфазной симметричной сети сумма токов трех фаз равна нулю, исчезает необходимость в обратном проводе. Если же трехфазная сеть используется для питания однофазных электроприемников, то нагрузка по фазам может быть неодинакова, и появляется необходимость в обратном проводе, в котором протекает разность токов трех фаз. В трехфазном четырехпроводном исполнении выполнены сети 0,4 кВ бытового назначения.

Уровни напряжения стандартизованы и величина их в России и странах СНГ соответствует следующей шкале:

220 В, 0,4; 1; 2; 3; 6; 10; 15; 20; 25; 35; 110; 154; 220; 330; 400; 500; 750; 1150 кВ.

При этом подразумевается величина напряжения между фазами – линейное напряжение.

Реальная величина напряжения электрических аппаратов может отличаться от этой шкалы на 5% и более – поэтому значения напряжения шкалы называются классом напряжения.

Трехфазные сети имеют четвертую точку, которая может существовать физически или условно. Эта точка называется нейтралью. Напряжение в этой точке равно геометрической сумме напряжений трех фаз, а напряжение фазы равно напряжению между фазным проводом и этой нейтральной точкой. Трехфазные аппараты могут иметь обмотки, соединенные между собой в звезду – концы всех обмоток соединяются в одну точку – это нейтраль – физически существующая нулевая точка. Если обмотки соединяются в треугольник – каждая обмотка подключается к обмоткам 2-х фаз – такая точка физически отсутствует, однако она существует – это земля, относительно которой и измеряются фазные напряжения. Напряжение между 2-мя фазами называется линейным (междуфазным напряжением), напряжение между фазой и землей – фазным.

По режиму нейтрали, сети разделяются на сети с изолированной и заземленной нейтралью.

К сетям с изолированной нейтралью относятся сети напряжением 220 В и 1-35 кВ. В этих сетях нулевая точка изолирована от земли, или соединена с землей через большое сопротивление дугогасящего реактора, или через активное сопротивление 500 – 100 Ом. Дугогасящий реактор компенсирует емкостной ток замыкания на землю, и через место замыкания, при резонансной настройке реактора, емкостной ток не протекает, а протекает только относительно малый активный ток утечки. За рубежом широко применяется, и начинает применяться у нас заземление нейтрали через резистор. При этом уменьшаются перенапряжения в сети при замыканиях на землю, и обеспечивается ток, достаточный для четкой работы защиты от замыкания на землю.

К сетям с заземленной нейтралью относятся сети 0,4 кВ и сети 110 -1150 кВ. В сетях с заземленной нейтралью, нейтраль обмотки трансформатора соединенной в звезду присоединяется к заземляющему контуру непосредственно, или через малое сопротивление. Сети напряжением 110-220 кВ называются также сетями с эффективно заземленной нейтралью. В таких сетях нейтраль части трансформаторов остается разземленной. Это снижет величину тока короткого замыкания и улучшает работу релейной защиты. Однако при этом требуется следить, чтобы ни в одном из возможных режимов не выделялся участок сети, где нейтрали всех трансформаторов изолированы.

1.2. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Понятие о векторах. На рис. 1.1 приведена кривая изменения переменного тока во времени. Ток сначала растет от нуля (при $\varphi = 0^\circ$) до максимального положительного значения $+I_{max}$ (при $\varphi = 90^\circ$), затем убывает, переходит через нуль (при $\varphi = 180^\circ$), достигает максимального отрицательного значения $-I_{max}$ (при $\varphi = 270^\circ$) и, наконец, возвращается к нулю (при $\varphi = 360^\circ$). После этого цикл изменения тока повторяется.

Кривая изменения переменного тока во времени, приведенная на рис. 1.1, называется синусоидой.

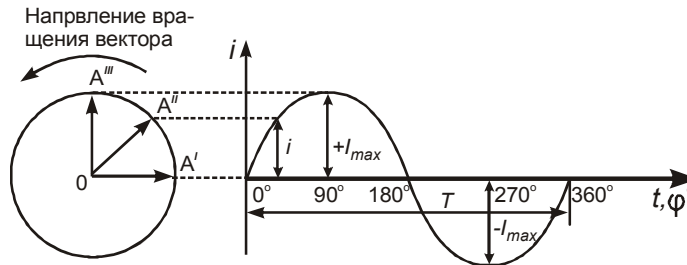


Рис. 1.1. Кривая изменения переменного тока во времени.

Время T , в течение которого происходит полный цикл изменения тока, соответствующий изменению угла на 360° , называется периодом переменного тока. Число периодов за 1 с называется частотой переменного тока. В промышленных установках и в быту в странах Европы используется главным образом переменный ток частотой 50 Гц. Этот ток 50 раз в секунду принимает положительное и отрицательное направление. Изменение переменного тока во времени можно записать в следующем виде:

$$i = I_{max} \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad \text{где} \quad (1.1)$$

i – мгновенное значение тока, т. е. значение тока в каждый момент времени;

I_{max} – максимальное значение тока;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока, $f = 50$ Гц, $\omega = 2\pi \cdot 50 = 314$;

α – начальный угол, соответствующий моменту времени, с которого начинается отсчет времени (при $t = 0$).

Для частного случая, показанного на рис. 1.1, $\alpha = 0^\circ$.

Анализируя действие устройств релейной защиты и автоматики, необходимо сопоставлять токи и напряжения, складывать или вычитать их, определять углы между ними и производить другие операции. Пользоваться при этом кривыми, подобными приведенной на рис. 1.1, неудобно, поскольку построение синусоид тока и напряжения занимает много времени и не дает простого и наглядного результата. Поэтому для упрощения принято изображать токи и напряжения в виде отрезков прямых линий, имеющих определенную длину и направление, — так называемых векторов (OA на рис. 1.1). Один конец вектора закреплен в точке O — начало координат, а второй вращается против часовой стрелки.

Мгновенное значение тока или напряжения в каждый момент времени определяется проекцией на вертикальную ось вектора, длина которого равна максимальному значению тока или напряжения. Эта проекция будет становиться то положительной, то отрицательной, принимая максимальные значения при вертикальном расположении вектора. За время T , равное периоду переменного тока, вектор совершит полный оборот по окружности (360°), занимая последовательно положения OA', OA'', OA''' и т. д. При частоте переменного тока 50 Гц вектор будет совершать 50 об/с.

Таким образом, вектор тока или напряжения — это отрезок прямой, равный по величине максимальному значению тока или напряжения, вращающийся относительно точки O против движения часовой стрелки со скоростью, определяемой частотой переменного тока. Зная положение вектора в каждый момент времени, можно определить мгновенное значение тока или напряжения в данный момент.

Так, для положения вектора тока OA, показанного на рис. 1.2, его мгновенное значение определяется проекцией на вертикальную ось, т. е. $OA'' = OA \sin \varphi$.

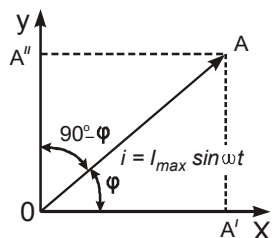


Рис. 1.2 Определение положения вектора на плоскости

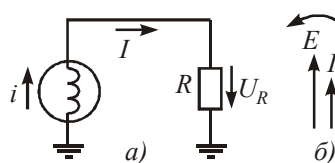


Рис. 1.3 Однофазная цепь переменного тока
а) – схема цепи;
б) – векторная диаграмма ЭДС и тока

На основании рис. 1.2 можно также сказать, что ток в данный момент времени имеет положительное значение. Однако это еще не дает полного представления о протекании процесса в цепи переменного тока, так как неизвестно, что значит положительный или отрицательный ток, положительное или отрицательное напряжение.

Для того чтобы векторные диаграммы токов и напряжений давали полную картину, их нужно увязать с фактическим протеканием процесса в цепи переменного тока, т. е. необходимо предварительно принять условные положительные направления токов и напряжений в рассматриваемой схеме. Без выполнения этого условия, если не заданы положительные направления токов и напряжений, любая векторная диаграмма не имеет никакого смысла.

Рассмотрим простую однофазную цепь переменного тока, приведенную на рис. 1,3, а. От однофазного генератора энергия передается в активное сопротивление нагрузки R . Зададимся положительными направлениями токов и напряжений в рассматриваемой цепи. За условное положительное направление напряжения и ЭДС примем направление, когда потенциал вывода генератора или нагрузки, связанного с линией, выше потенциала вывода, соединенного с землей. В соответствии с правилами, принятыми в электротехнике, положительное направление для ЭДС обозначено стрелкой, направленной в сторону более высокого потенциала (от земли к линейному выводу), а – для напряжения – стрелкой, направленной в сторону более низкого потенциала (от линейного вывода к земле). Переменный ток будем считать положительным, когда во внешней цепи он проходит от шин генератора к нагрузке (обозначено стрелкой). Построим векторы ЭДС и тока, характеризующие работу рассматриваемой, цепи (рис, 1.3, б). Вектор ЭДС произвольно обозначим вертикальной линией со стрелкой, направленной вверх. Для построения вектора тока запишем для цепи уравнение согласно второму закону Кирхгофа;

$$\text{отсюда:} \quad I = \frac{E}{R} \quad (1.2)$$

Поскольку знаки векторов тока и ЭДС в выражении (1.2) совпадают, вектор тока будет совпадать с вектором ЭДС и на рис. 1.3.б. Здесь и в дальнейшем при построении векторов будем откладывать их по величине равными эффективному значению тока и напряжения, что удобно для выполнения различных математических операций с векторами. Как известно, эффективные значения тока и напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше соответствующих максимальных (амплитудных). При заданных положительных направлениях тока и напряжения однозначно определяется и знак мощности. Положительной в рассматриваемом случае будет считаться мощность, направленная от шин генератора в линию:

$$P = EI \cdot \cos \varphi = EI \cdot \cos 0^\circ = EI \quad (1.3)$$

так как векторы тока и ЭДС на рис. 1.3, б совпадают.

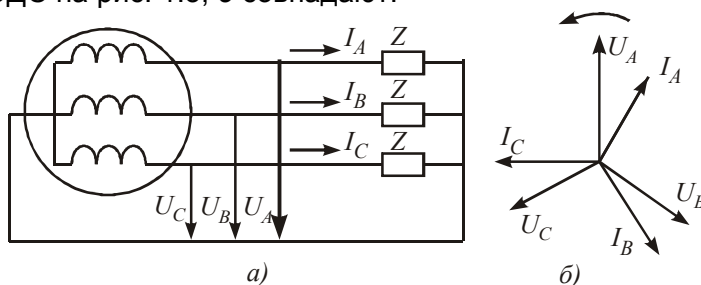


Рис. 1.4. Трехфазная цепь переменного тока.
а) – схема цепи; б) – векторная диаграмма токов и напряжений.

Аналогичные соображения могут быть высказаны и для трехфазной цепи переменного тока, показанной на рис. 1.4, а. В этом случае во всех фазах приняты одинаковые положительные направления, чему соответствует симметричная диаграмма токов и напряжений, приведенная на рис. 1.4, б. Отметим, что симметричной называется такая трехфазная система векторов, когда все три вектора равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на угол 120° .

Операции с векторами.

Когда мы рассматриваем только одну кривую тока или напряжения, начальное значение угла, с которого начинается отсчет, или, иначе говоря, положение вектора на диаграмме, соответствующее началу времени, может быть принято произвольным. Если же одновременно рассматриваются два или несколько токов и напряжений, то, задавшись начальным положением на диаграмме одного из векторов, мы тем самым уже определяем положение всех других векторов.

Все три вектора: фазных напряжений: $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, показанные на рис. 1.4, б, вращаются против часовой стрелки с одинаковой скоростью, определяемой частотой переменного тока. При этом они пересекают вертикальную ось, совпадающую с направлением вектора \dot{U}_A на рис. 1.4, б, поочередно с определенной последовательностью, а именно $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, которая называется чередованием фаз напряжения (или тока). Для того чтобы определить взаимное расположение двух векторов, обычно говорят, что один из них опережает или отстает от другого. При этом опережающим считается вектор, который при вращении против часовой стрелки раньше пересечет вертикальную ось. Так, например, можно сказать, что вектор напряжения \dot{U}_A на рис. 1.4, б опережает \dot{U}_B на угол 120° или, с другой стороны, вектор \dot{U}_C отстает от вектора \dot{U}_B на угол 120° . Как видно из рис. 1.4, выражение «вектор отстает на угол 120° », равноценно выражению «вектор опережает на угол 240° ».

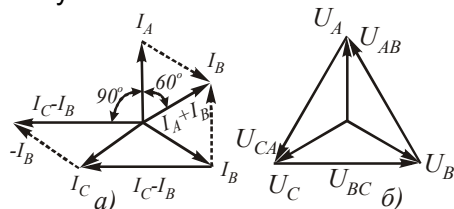


Рис. 1.5. Сложение и вычитание векторов: а) — токов; б) — напряжений.

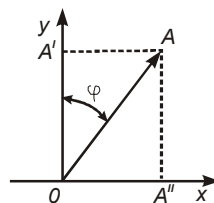


Рис. 1.6. К определению вектора через его проекции на перпендикулярные оси.

Сложение векторов производится геометрическим суммированием по правилу параллелограмма, как показано на рис. 1.5, а, на котором построена сумма токов ($\dot{I}_A + \dot{I}_B$). Так как вычитание — действие, обратное сложению, для определения разности токов (например, $(\dot{I}_C - \dot{I}_B)$) достаточно к току \dot{I}_C прибавить вектор, обратный \dot{I}_B . Вместе с тем на рис. 1.5, а показано, что вектор разности токов ($\dot{I}_C - \dot{I}_B$) можно построить проще, соединив линией концы векторов \dot{I}_C и \dot{I}_B . При этом стрелка вектора разности токов направляется в сторону первого вектора, т. е. \dot{I}_C .

Аналогично строится векторная диаграмма междуфазных напряжений, например, $\dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC}$ (рис. 1.5, б).

Очевидно, что положение вектора на плоскости определяется его проекциями на две любые оси. Так, например, для того чтобы определить положение вектора ОА (рис. 1.6), достаточно знать его проекции на взаимно перпендикулярные оси.

$$OA' = OA \cdot \cos \varphi$$

$$OA'' = OA \cdot \sin \varphi = OA \cos(90 - \varphi)$$

Отложим на осях координат проекции векторов OA' и OA'' и восстановим из точек A' и A'' перпендикуляры к осям. Точка пересечения этих перпендикуляров и есть точка А — один конец вектора, вторым концом которого является точка О — начало координат.

Назначение векторных диаграмм

Работникам, занимающимся проектированием и эксплуатацией релейной защиты, часто приходится использовать в своей работе так называемые векторные диаграммы — векторы токов и

напряжений, построенные на плоскости в определенном сочетании, соответствующем электрическим процессам, происходящим в рассматриваемой схеме.

Анализ векторных диаграмм токов и напряжений является одним из важных, а в ряде случаев единственным способом проверки правильности соединения цепей тока и напряжения и включения реле в схемах дифференциальных и направленных защит.

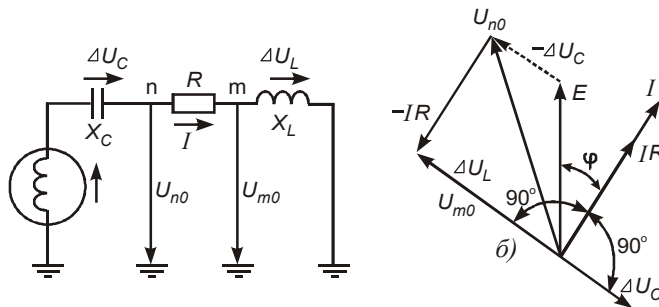


Рис.1.7 К расчету цепи переменного тока
а) – схема цепи; б) – векторная диаграмма

По сути, построение векторной диаграммы целесообразно во всех случаях, когда к рассматриваемому реле подаются две или более электрические величины: разность токов в максимальной токовой или дифференциальной защите, ток и напряжение в реле направления мощности или в направленном реле сопротивления. Векторная диаграмма позволяет сделать заключение о том, как рассматриваемая защита будет работать при КЗ, т. е. оценить правильность ее включения. Взаимное расположение векторов токов и напряжений на диаграмме определяется характеристикой рассматриваемой цепи, а также условно принятыми положительными направлениями токов и напряжений.

Для примера рассмотрим две векторные диаграммы.

На рис. 1.7 показана однофазная цепь переменного тока, состоящая из генератора и последовательно соединенных емкостного, активного и индуктивного сопротивлений. Примем при этом, что индуктивное сопротивление больше емкостного (\$X_L > X_C\$). Положительные направления токов и напряжений, так же как и в случаях, рассмотренных выше, обозначены на рис. 1.7,а стрелками.

Построение векторной диаграммы начнем с вектора ЭДС \$E\$, который расположим на рис. 1.7,б вертикально. Ток, проходящий в рассматриваемой цепи, определится из следующего выражения:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (1.4)$$

Поскольку в рассматриваемой цепи имеются активные и реактивные сопротивления, причем \$X_L > X_C\$, вектор тока отстает от вектора напряжения на угол \$\varphi\$:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$$

Напряжение в точке \$n\$ на рис. 1.7, а определится согласно следующему выражению:

$$\bar{U}_{no} = \bar{E} - \Delta \bar{U}_C$$

На рис. 1.7, б построен вектор \$\dot{U}_C\$ отстающий от вектора \$\dot{I}\$ на угол \$90^\circ\$. Напряжение в точке \$n\$ \$\dot{U}_{no}\$ определится разностью векторов \$\dot{E}\$ и \$\dot{U}_C\$. Напряжение в точке \$m\$ определится аналогично:

$$\dot{U}_{mo} = \dot{U}_{no} - \dot{I}R$$

Как видно из рас. 1.7,б, этот последний вектор \$\dot{U}_{mo}\$ будет равен падению напряжения в индуктивном сопротивлении \$\Delta \dot{U}_L\$.

Рассмотрим другую цепь переменного тока, приведенную на рис. 1.8,а, и построим векторную диаграмму, характеризующую распределение токов в параллельных ветвях. Для построения диаграммы примем, что активное и емкостное сопротивления равны:

$$R = X_c$$

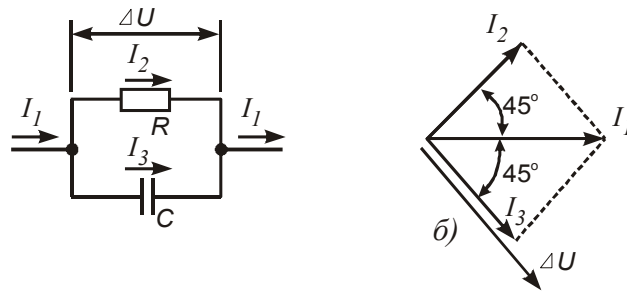


Рис.1.8. К расчету распределения тока.
а) – схема цепи; б) – векторная диаграмма токов

Построение векторной диаграммы начнем с вектора I_1 , который расположим горизонтально. Затем построим вектор падения напряжения на сопротивлениях ΔU , отстающий от вектора I_1 на угол φ , так как результирующее сопротивление имеет активно-емкостной характер. Угол определяется следующим выражением:

$$\varphi = \arctg \frac{X_c}{R}$$

В рассматриваемом случае $\varphi = 45^\circ$. Вектор тока I_2 , проходящего по активному сопротивлению, совпадает с ΔU , а I_3 опережает ΔU на 90° , как показано на рис. 1.8,б.

Векторные диаграммы при наличии трансформации.

При наличии в электрической цепи трансформаторов необходимо ввести дополнительные условия, для того чтобы сопоставлять векторные диаграммы токов и напряжений на разных сторонах трансформатора. Положительные направления токов при этом следует задавать с учетом полярности обмоток трансформатора. В зависимости от направления намотки обмоток трансформатора взаимное направление токов в них меняется. Для того чтобы определять направление токов в обмотках силового трансформатора и сопоставлять их между собой, обмоткам трансформатора дают условные обозначения «начало» и «конец».

В схеме, приведенной на рис. 1.3, между источником ЭДС и нагрузкой включим трансформатор (рис. 1.9, а). Обозначим начала обмоток силового трансформатора буквами А и а, концы - X и x. При этом следует иметь в виду, что начало одной из обмоток принимается произвольно, а второй - определяется на основании условных положительных направлении токов, заданных для обеих обмоток трансформатора.

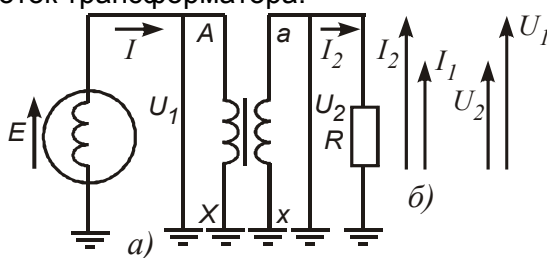


Рис.1.9. К определению условных положительных направлений токов и напряжений в обмотках трансформатора.

а) – схема цепи; б) – диаграмма токов и напряжений в обмотках трансформатора.

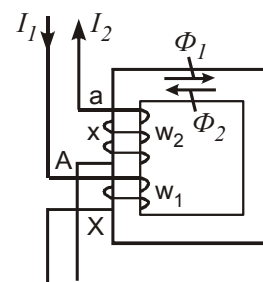


Рис. 1.10. Принцип устройства трансформатора.

На рис. 1.9, а показаны положительные направления токов в обмотках силовых трансформаторов. В первичной обмотке положительным считается направление тока от начала к концу, а во вторичной — от конца к началу. При таких условно принятых положительных направлениях токов в обмотках трансформатора направление тока в нагрузке остается таким же, каким оно было бы при отсутствии трансформатора и непосредственном подключении нагрузки к генератору (см. рис. 1.3 и 1.9). При этом, поскольку магнитные потоки, создаваемые в магнитопроводе трансформатора обоими токами (первичным и вторичным), направлены встречно (рис. 1.10), для идеального трансформатора, пренебрегая током намагничивания, можно записать следующее равенство:

$$\phi_1 - \phi_2 = 0 \text{ или } \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2 = 0 \quad (1.5)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 — магнитные потоки в магнитопроводе трансформатора, а $\dot{I}_1 w_1$ и $\dot{I}_2 w_2$ — магнитодвижущие силы (МДС), создающие эти потоки.

Из последнего уравнения:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(\frac{w_2}{w_1} \right) \quad (1.6)$$

Согласно последнему равенству векторы \dot{I}_1 и \dot{I}_2 имеют одинаковые знаки и, следовательно, будут совпадать по направлению (см. рис. 1.9,б). Таким образом, условно принятые положительные направления токов в обмотках трансформатора удобны тем, что векторы первичного и вторичного токов на векторной диаграмме совпадают по направлению (рис. 1.9,б). Для напряжений также удобно принять такие положительные направления, чтобы векторы первичного и вторичного напряжений на обмотках совпадали, как показано на рис. 1.9.

В зависимости от схемы соединения обмоток трансформатора (в звезду или треугольник), способа соединения выводов для образования треугольника и порядка подключения фаз сети к выводам трансформатора возможно получение различных групп соединения.

Группой соединения трансформатора считается сдвиг по фазе линейного (фазного) напряжения обмотки НН по отношению к одноименному линейному (фазному) напряжению обмотки ВН. Группы соединения принято определять по циферблату часов, считая вектор напряжения ВН исходным и направленным на цифру 12. Цифра на циферблате, на которую укажет вектор напряжения обмотки НН и определяет группу соединения обмоток. В странах СНГ выпускались в основном трансформаторы групп 12 (Y/Y) и 11 (Y/Δ), но в зависимости от способа подключения обмоток к фазам сети, встречаются также группы 1, 5, 7. Так, например, при подаче на трансформатор 11 группы соединений (Y/Δ), обратного чередования фаз сети, на выходе мы получим аналог 1 группы соединений.

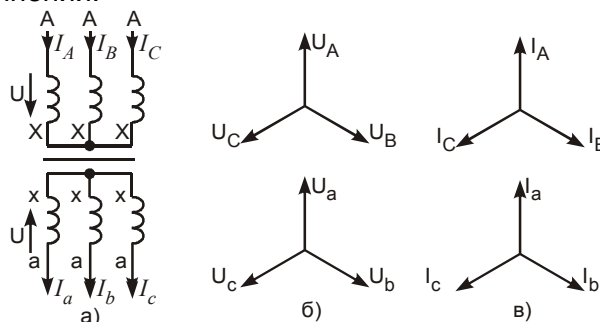


Рис. 1.11 Включение трансформатора по схеме У/У-12:

а) схема соединения обмоток; б) векторная диаграмма напряжений; в) векторная диаграмма токов

В рассматриваемом случае (рис.1.10) имеет место соединение обмоток трансформатора по схеме 1/1-12. Соответственно для трехфазного трансформатора У/У-12 схема соединений и векторная диаграмма токов и напряжений показаны на рис. 1.11.

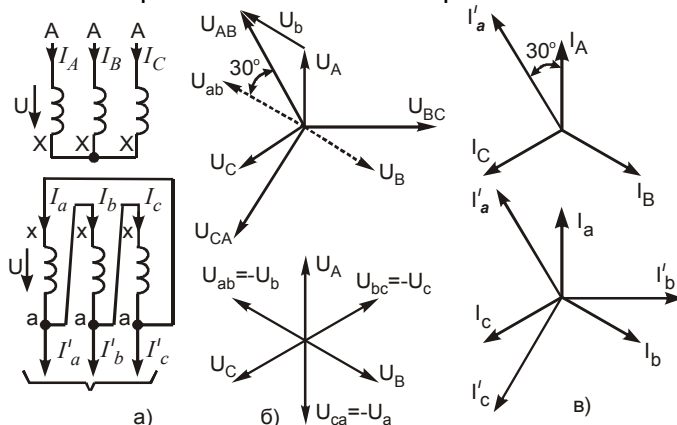


Рис. 1.12 Включение трансформатора по схеме Y/Δ-11:

а) — схема соединения обмоток;
б) — векторная диаграмма напряжений;
в) — векторная диаграмма токов

На рис. 1.12, представлена схема соединений трансформатора $Y/\Delta-11$, и векторные диаграммы напряжений и токов, соответствующие данной схеме соединения. На стороне высшего напряжения, где обмотки соединены в звезду, междуфазные напряжения в $\sqrt{3}$ раз превышают фазные напряжения. На стороне же низшего напряжения, где обмотки соединены в треугольник, междуфазные и фазные напряжения равны. Векторы междуфазных напряжений стороны низшего напряжения опережают на 30° аналогичные векторы междуфазных напряжений стороны высшего напряжения, что и соответствует схеме соединений $Y/\Delta-11$.

Для рассматриваемой схемы соединений обмоток трансформатора можно построить и векторные диаграммы токов, проходящих с обеих его сторон. При этом следует иметь в виду, что на основании принятых нами условий определяются только положительные направления токов в обмотках трансформатора. Положительные же направления токов в линейных проводах, соединяющих выводы обмоток низшего напряжения трансформатора с шинами, могут быть приняты произвольно независимо от положительных направлений токов, проходящих в треугольнике.

Так, например, если принять положительные направления токов в фазах, проходящих в треугольнике на стороне низшего напряжения в сторону выводов к шинам (рис. 1.12, а), можно записать следующие равенства:

$$\dot{I}'_a = \dot{I}_a - \dot{I}_b; \quad \dot{I}'_b = \dot{I}_b - \dot{I}_c; \quad \dot{I}'_c = \dot{I}_c - \dot{I}_a \quad (1.7)$$

Соответствующая векторная диаграмма токов показана на рис. 1.12, в.

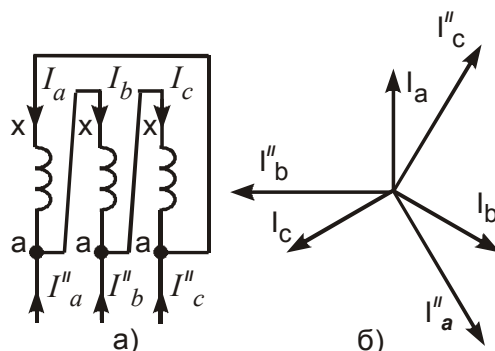


Рис. 1.13 Векторная диаграмма токов при изменении положительных направлений токов на выводах обмоток, соединенных в треугольник на стороне низшего напряжения

Аналогично можно построить векторную диаграмму токов и для случая, когда положительные направления токов приняты от шин к выводам треугольника (рис. 1.13,а). Этому случаю соответствуют следующие равенства:

$$\dot{I}''_a = \dot{I}_a - \dot{I}_b; \quad \dot{I}''_b = \dot{I}_b - \dot{I}_c; \quad \dot{I}''_c = \dot{I}_c - \dot{I}_a \quad (1.8)$$

и векторные диаграммы, приведенные на рис. 1.13,б). Сравнивая диаграммы токов, приведенные на рис. 1.12,в) и 1.13,б), можно сделать вывод, что векторы фазных токов, проходящих в проводах, соединяющих выводы обмоток низшего напряжения трансформатора и шины, находятся в противофазе. Конечно, как те, так и другие диаграммы верны. Таким образом, при наличии в схеме обмоток, соединенных в треугольник, необходимо задаваться положительными направлениями токов, как в самих обмотках, так и в линейных проводах, соединяющих треугольник с шинами. В рассматриваемом случае при определении группы соединений силового трансформатора удобно за положительные принимать направления от выводов низшего напряжения к шинам, так как при этом векторные диаграммы токов совпадают с принятым обозначением групп соединения силовых трансформаторов (см. рис. 1.12,б и в). Аналогично могут быть построены векторные диаграммы токов и для других групп соединения силовых трансформаторов. Сформулированные выше правила построения векторных диаграмм токов и напряжений в схемах с трансформаторами действительны и для измерительных трансформаторов тока и напряжения.

1.3. ПОВРЕЖДЕНИЯ И НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Основные сведения о коротких замыканиях

Короткие замыкания, возникающие в электрических сетях, машинах и аппаратах, отличаются большим разнообразием как по виду, так и по характеру повреждения. Для упрощения расчетов

и анализа поведения релейной защиты при повреждениях исключаются отдельные факторы, не оказывающие существенного влияния на значения токов и напряжений.

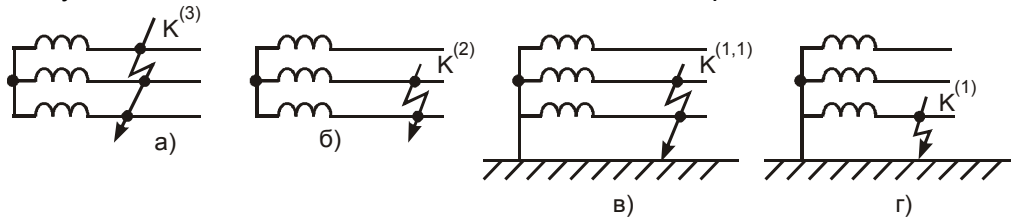


Рис. 1.14 Основные виды коротких замыканий:

а) – трехфазное; б) – двухфазное; в) – двухфазное на землю; г) – однофазное

В частности, как правило, при расчетах не учитывается переходное сопротивление в месте КЗ, и все повреждения рассматриваются как непосредственное (или, как говорят, «глухое» или «металлическое») соединение фаз между собой, или на землю (для сети с заземленной нейтралью). Не учитываются токи намагничивания силовых трансформаторов и емкостные токи линий электропередачи напряжением до 330 кВ. Сопротивления всех трех фаз считаются одинаковыми.

Основные виды КЗ показаны на рис. 1.14. Междофазные КЗ — двухфазные и трехфазные — возникают в сетях как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. Однофазные КЗ могут происходить только в сетях с заземленной нейтралью.

Основными причинами, вызывающими повреждения на линиях электропередачи, являются перекрытия изоляции во время грозы, схлестывания и обрывы проводов при гололеде, набросы, перекрытия изоляции испражнениями птиц (аистов), перекрытия загрязненной и увлажненной изоляции, ошибки персонала и др.

Трехфазное короткое замыкание. Симметричное трехфазное КЗ — наиболее простой для расчета и анализа вид повреждения. Он характерен тем, что токи и напряжения всех фаз равны по значению как в месте КЗ, так и в любой другой точке сети:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c; \quad \dot{U}_a = \dot{U}_b = \dot{U}_c \quad (1.9)$$

Векторная диаграмма токов и напряжений при трехфазном КЗ приведена на рис. 1.15. Поскольку рассматриваемая система симметрична, ток КЗ, проходящий в каждой фазе, отстает от создающей его ЭДС на одинаковый угол (φ_n), определяемый соотношением активного и реактивного сопротивлений цепи короткого замыкания:

$$\varphi_n = \arctg \frac{X_\Sigma}{R_\Sigma} \quad (1.10)$$

Для линий 110 кВ этот угол равен 60—78°; 220 кВ (один провод в фазе) — 73—82°; 330 кВ (два провода в фазе) — 80—85°; 500 кВ (три провода в фазе) — 84—87°; 750 кВ (четыре провода в фазе) — 86—88° (большие значения угла соответствуют большим сечениям проводов).

Напряжение в месте КЗ равно нулю, а в любой другой точке сети может быть определено, как показано на рис. 1.15, б. Так как все фазные и междофазные напряжения в точке трехфазного короткого замыкания равны нулю, а в точках, удаленных от места КЗ на небольшое расстояние, их уровни незначительны. Рассматриваемый вид повреждения представляет наибольшую опасность для работы энергосистемы с точки зрения устойчивости параллельной работы электростанций и узлов нагрузки.

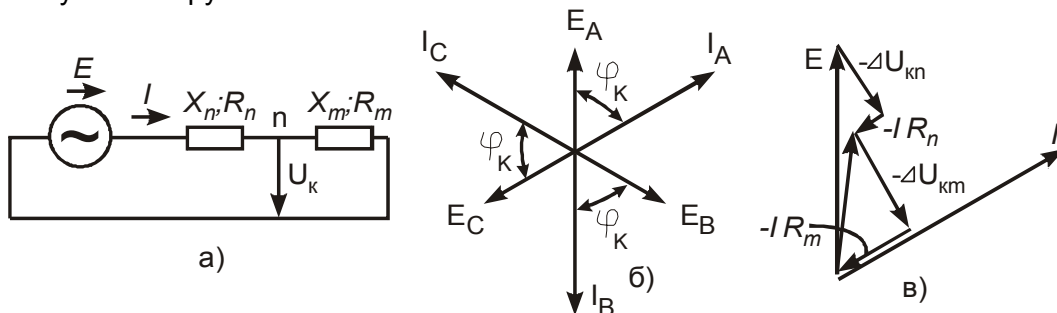


Рис. 1.15 Трехфазное КЗ;

а) – расчетная схема; б) – диаграмма токов и напряжений в месте КЗ;

в) – векторная диаграмма для определения напряжений в промежуточных точках сети.

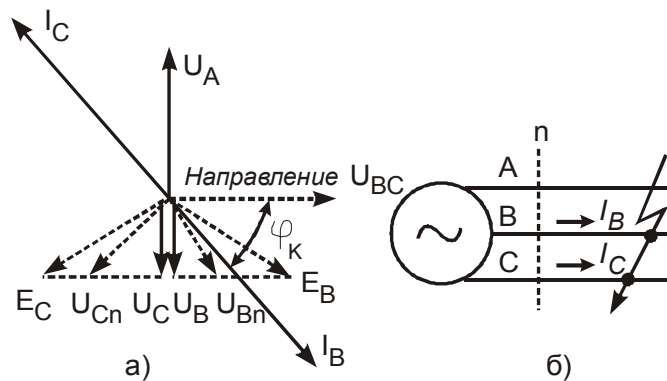


Рис. 1.16 Двухфазное КЗ между фазами В и С.

а) – векторная диаграмма токов и напряжений; б) – схема сети

Двухфазное короткое замыкание. При двухфазном КЗ токи и напряжения разных фаз неодинаковы. Рассмотрим соотношения токов и напряжений, характерные для двухфазного КЗ между фазами В и С (рис. 1.16). В поврежденных фазах и месте КЗ проходят одинаковые токи, а в неповрежденной фазе ток КЗ отсутствует

$$\dot{I}_a = 0; \quad \dot{I}_b = \dot{I}_c \quad (1.11)$$

Междуфазное напряжение (\dot{U}_{bc}) в месте КЗ равно нулю, а фазные напряжения

$$\dot{U}_b = \dot{U}_c = \dot{E}/2; \quad \dot{U}_{bc} = 0 \quad (1.11a)$$

Так же как и при трехфазном КЗ, токи, проходящие в поврежденных фазах, отстают от создающей их ЭДС (в данном случае от ЭДС \dot{E}_{bc} или параллельного ему вектора \dot{U}_{bc}) на угол φ_K , определяемый соотношением активных и реактивных сопротивлений цепи.

Соответствующие векторные диаграммы для места КЗ построены на рис. 1.16, а). По мере удаления от места КЗ фазные напряжения U_B , U_C и междуфазное напряжение \dot{U}_{ac} будут увеличиваться, как показано на рис. 1.16, а штриховыми линиями для точки л.

С точки зрения влияния на устойчивость параллельной работы генераторов и на работу электродвигателей рассматриваемый вид повреждения представляет значительно меньшую опасность, чем трехфазное КЗ.

Двухфазное короткое замыкание на землю в сети с заземленной нейтралью. Этот вид повреждения для сетей с изолированной нейтралью практически не отличается от двухфазного КЗ. Токи, проходящие в месте КЗ и в ветвях рассматриваемой схемы, а также междуфазные напряжения в разных точках сети имеют те же самые значения, что и при двухфазном КЗ.

В сетях же с заземленной нейтралью двухфазное КЗ на землю значительно более опасно, чем двухфазное КЗ. Это объясняется более значительным снижением междуфазных напряжений в месте КЗ, так как одно междуфазное напряжение уменьшается до нуля, а два других – до значения фазного напряжения неповрежденной фазы (рис. 1.17).

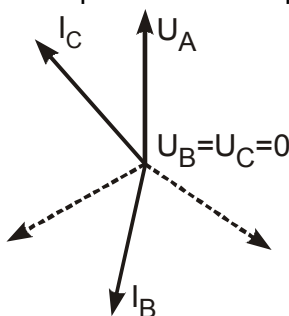


Рис. 1.17. Векторная диаграмма токов и напряжений в месте двухфазного КЗ между фазами В и С на землю.

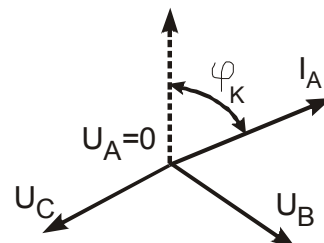


Рис. 1.18. Векторная диаграмма токов и напряжений в месте однофазного КЗ на землю фазы А.

Соотношения токов и напряжений в месте КЗ для этого вида повреждения имеют следующий вид:

$$\dot{I}_a = 0; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_c = 0 \quad (1.12)$$

Однофазное короткое замыкание в сети с заземленной нейтралью. Однофазное КЗ может иметь место только в сетях с заземленной нейтралью. Векторные диаграммы токов и на-

пряжений в месте однофазного КЗ фазы А приведены на рис. 1.18, а формулы, определяющие соотношения между ними, даны ниже:

$$\dot{U}_a = 0; \quad \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0 \quad (1.13)$$

Однофазные КЗ, сопровождающиеся снижением до нуля в месте повреждения только одного фазного напряжения, представляют меньшую опасность для работы энергосистемы, чем рассмотренные выше междуфазные КЗ.

Однофазное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью.

В сетях с малыми токами замыкания на землю, к которым относятся сети 3—35 кВ, работающие с изолированной нейтралью, или с нейтралью заземленной через дугогасящий реактор, замыкание одной фазы на землю сопровождается значительно меньшими токами, чем токи КЗ.

При замыкании на землю одной фазы фазное напряжение поврежденной фазы (U_a на рис. 1.19, а) относительно земли становится равным нулю, а напряжения неповрежденных фаз U_b и U_c увеличиваются в 1,73 раза и становятся равными междуфазным ($\dot{U}_{bc}^{(1)}$ и $\dot{U}_{ca}^{(1)}$ на рис. 1.19, б).

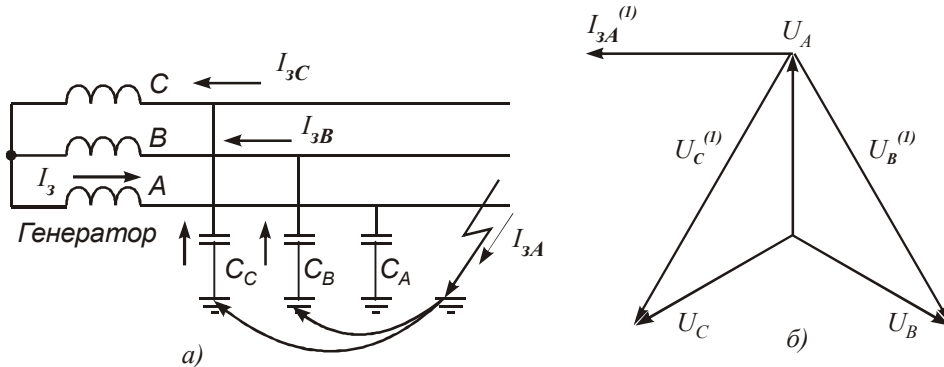


Рис. 1.19 Однофазное замыкание на землю фазы А в сети с малым током замыкания на землю (изолированная нейтраль).

Под действием напряжений \dot{U}_b и \dot{U}_c через место повреждения проходит ток \dot{I}_{3A} , замыкающийся через емкости неповрежденных фаз В и С. Емкость поврежденной фазы зашунтирована местом замыкания, и поэтому ток через нее не проходит. Значение тока в месте замыкания на землю определяется следующим выражением:

$$\dot{I}_{3A} = \frac{\dot{U}_b^{(1)}}{X_\Sigma} + \frac{\dot{U}_c^{(1)}}{X_\Sigma}; \quad \text{где}$$

X_Σ – суммарное сопротивление цепи замыкания на землю. Поскольку активные и индуктивные сопротивления генераторов, трансформаторов и кабельных линий много меньше, чем емкостное сопротивление сети, ими можно пренебречь, тогда

$$X_\Sigma = X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1.14)$$

где: f – частота сети, равная 50 Гц;

C – емкость одной фазы сети относительно земли.

Поскольку при замыкании фазы А на землю напряжения фаз В и С относительно земли равны по значению междуфазному напряжению и сдвинуты на угол 60° , то $|\dot{U}_b^{(1)} + \dot{U}_c^{(1)}| = 3U_{\phi a}$

В результате

$$\dot{I}_a = 3U_{\phi} \omega C = 3U_{\phi} \pi f C \quad (1.15)$$

Емкость сети в основном определяется длиной присоединенных линий, в то время как емкости относительно земли обмоток генераторов и трансформаторов сравнительно невелики. Для расчета емкостного тока (А/км), проходящего при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью, можно воспользоваться следующими выражениями, определяющими ток на 1 км кабельной линии:

– для линии 6 кВ
$$\dot{I}_3 = \frac{95 + 2,84S}{2200 + 6S} \cdot U_{ном}$$

$$I_z = \frac{95 + 1,44S}{2200 + 0,23S} \cdot U_{ном} \quad \text{где:}$$

– для линии 10 кВ

S – сечение кабеля, мм²;

$U_{ном}$ – номинальное междуфазное напряжение кабеля, кВ.

Для воздушных линий можно принимать следующие удельные значения емкостных токов: 6 кВ — 0,015 А/км; 10 кВ — 0,025 А/км; 35 кВ — 0,1 А/км. Для сетей с изолированной нейтралью считается допустимой работа при емкостных токах замыкания на землю не превосходящих величины 20А, 15А, 10А соответственно для сети 6кВ, 10кВ, 35кВ. Для линий с железобетонными опорами независимо от уровня напряжения ток замыкания на землю должен быть не более 10А. Это требуется для предотвращения повреждения железной арматуры опоры длительно протекающим током замыкания на землю.

Для снижения тока замыкания на землю применяются специальные компенсирующие устройства — дугогасящие катушки, которые подключаются между нулевыми точками трансформаторов или генераторов и землей. В зависимости от настройки дугогасящей катушки ток замыкания на землю уменьшается до нуля, или до небольшого остаточного значения.

Поскольку токи замыкания на землю имеют небольшие значения, а все междуфазные напряжения остаются неизменными (рис. 1.19), однофазное замыкание на землю не представляет непосредственной опасности для потребителей. Защита от этого вида повреждения, как правило, действует на сигнал. Однако длительная работа сети с заземленной фазой нежелательна, так как длительное прохождение тока в месте замыкания на землю, а также повышенные в 1,73 раза напряжения неповрежденных фаз относительно земли могут привести к пробое или повреждению их изоляции и возникновению двухфазного КЗ. Поэтому работа сети с заземлением одной фазы допускается только в течение 2 ч. За это время оперативный персонал с помощью устройств сигнализации должен обнаружить и вывести из схемы поврежденный участок. Пробой изоляции другой фазы может произойти в другом месте данной линии, или вообще на другой линии или шинах. Такое замыкание называется двойным замыканием на землю. Это короткое замыкание, ток проходит часть пути через места замыкания и через землю. В данном случае в принципе достаточно отключить только одно место замыкания на землю, после чего в сети останется только другое.

При заземлении нейтрали через активное сопротивление (чаще всего это бетэловые резисторы общим сопротивлением 100 Ом), в месте КЗ протекает активный ток, величина которого определяется практически только сопротивлением этого резистора.

$$I_z = \frac{U_\phi}{R_n}$$

Для сети 10кВ этот ток равняется примерно 60 А, для сети 6 кВ – 36 А.

Такое замыкание необходимо отключать для предотвращения развития повреждения.

В сетях с изолированной нейтралью, питающих торфопредприятия и передвижные строительные механизмы, для обеспечения условий безопасности обслуживающего персонала, защита от замыканий на землю выполняется с действием на отключение.

В настоящее время рассматривается вопрос об отключении замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью на линиях, проходящих в населенной местности, так как приближение к оборванному проводу может быть опасно для жизни людей.

Другие ненормальные режимы оборудования

Перегрузка оборудования, вызванная увеличением тока сверх номинального значения. Номинальным называется максимальное значение тока, допускаемое для данного оборудования в течение неограниченного времени. Если ток I , проходящий по оборудованию, превышает номинальное значение, то за счет выделяемой им дополнительной теплоты температура токоведущих частей и изоляции через некоторое время превосходит допустимое значение, что приводит к ускоренному старению изоляции и токоведущих частей.

Время t_d , допустимое для прохождения повышенных токов, зависит от их значения. Характер этой зависимости, определяемой конструкцией оборудования и типом изоляционных материалов, приведен на рис. 1.20. Величина выделяемого тепла определяется квадратом тока, и поэтому нагрев резко растет с увеличением кратности тока. Причиной сверхтока может быть увеличение нагрузки, или появление КЗ за пределами защищаемого элемента (внешнее КЗ). Для предупреждения повреждения оборудования при его перегрузке необходимо принять меры к его разгрузке или отключению в пределах времени t_d .

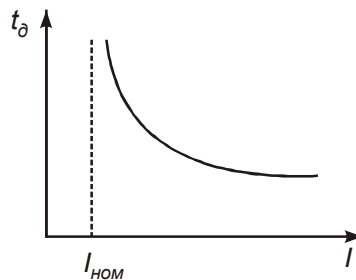


Рис.1.20. Зависимость допустимой длительности перегрузки от значения тока $t_d = f(I)$ ($I_{ном}$ — номинальный ток оборудования).

Повышение напряжения. Обычно возникает на трансформаторах, генераторах и линиях высокого напряжения и может быть передано в распределительные сети. В распределителях появляются дополнительные причины для повышения напряжения: неправильная работа РПН, влияние емкостной компенсации при внезапном сбросе нагрузки. В ряде случаев, величина такого напряжения может оказаться опасной для оборудования: электронных устройств, бытовых приборов, двигателей и трансформаторов. Например, для ламп накаливания повышение напряжения на 5% свыше номинального сокращает срок их службы в два раза. Действующими нормами защита от таких режимов требуется для устройств емкостной компенсации (БСК).

Понижение напряжения. Оно особенно опасно для электродвигателей, которые, для поддержания необходимой величины момента, увеличивают потребление тока, что приводит к их токовой перегрузке и выходу из строя. При понижении напряжения резко уменьшается светоотдача ламп накаливания. Защита от понижения напряжения обычно применяется в сетях промышленного назначения, питающих электродвигатели, в особенности синхронные, а также в сети собственных нужд электростанций.

Режим работы двумя фазами. Он происходит при обрыве фазы в питающей сети. Двигатели при этом могут остаться в работе, если момента развиваемого двигателями достаточно, или остановиться. В обоих случаях ток резко растет, что приводит к перегрузке двигателя и выходу его из строя. Поэтому очень часто двигатели снабжаются специальной защитой от работы двумя фазами (обрыва фазы). Для предотвращения возникшей перегрузки может быть использована и защита от перегрузки, действующая на отключение, эта защита должна быть установлена хотя бы в двух фазах, чтобы защита не оказалась подключенной к оборванной фазе.

Грозовые перенапряжения. Для защиты оборудования станций, подстанций и сетей от грозовых перенапряжений при прямых ударах молнии применяются грозозащитные тросы над воздушными линиями и специальные вентильные или искровые разрядники. Пробивное напряжение вентильных разрядников составляет приблизительно 2,2-3 Ун.

Коммутационные перенапряжения возникают из-за неодновременности отключения или включения токов фаз коммутационными аппаратами, всплесков сверхЭДС самоиндукции силовых трансформаторов при резком изменении (отключении) тока. В последнем случае уровень перенапряжения зависит от величины и скорости изменения тока. При коммутации вакуумными выключателями малых индуктивных токов (отключение ненагруженных силовых трансформаторов, или запускаемых электродвигателей) при некоторых сочетаниях параметров присоединения и выключателя возможен разрыв тока не при переходе синусоиды тока через ноль, как в масляных выключателях, а в любой момент периода (срез тока), сопровождающийся значительными перенапряжениями, опасными для оборудования. Так как обычные разрядники от коммутационных перенапряжений не срабатывают, в таких случаях для защиты оборудования требуется применение специальных ограничителей перенапряжения (ОПН).

1.3. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Понятие о симметричных составляющих

При однофазном или двухфазном КЗ, когда трехфазная система становится несимметричной, нельзя выполнять расчет только для одной из фаз, как это делается при трехфазных симметричных повреждениях. Для определения токов, проходящих при несимметричных КЗ, потребовалось бы составлять несколько уравнений Кирхгофа для многих контуров и узлов, образующихся в рассматриваемой несимметричной трехфазной системе. Решение этих уравнений с учетом индуктивных связей между фазами даже при сравнительно простой схеме сети является весьма сложной задачей.

С целью упрощения расчетов несимметричных режимов в трехфазной сети предложен метод симметричных составляющих. Сущность этого метода состоит в том, что любую трехфазную

несимметричную систему векторов токов или напряжений можно заменить суммой трех симметричных систем:

- прямой последовательности, в которой векторы, вращающиеся против часовой стрелки, следуют друг за другом в чередовании A, B, C ;
- обратной последовательности, отличающейся обратным чередованием векторов A, C, B ;
- нулевой последовательности, в которой векторы всех фаз совпадают по направлению.

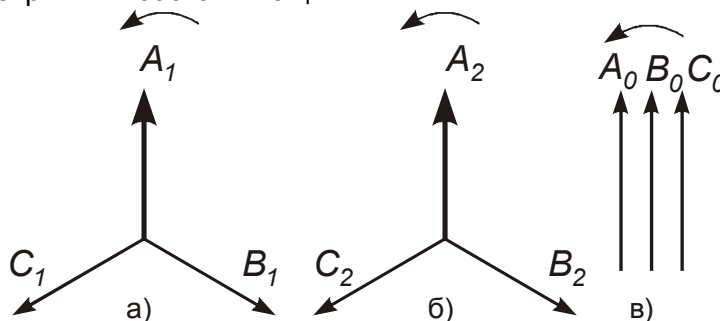
Ток (напряжение) КЗ равняется сумме токов (напряжений) прямой, обратной и нулевой последовательности.

$$I_{K3} = I_1 + I_2 + I_0; \quad U_{K3} = U_1 + U_2 + U_0 \quad (1.16)$$

Производится расчет этих трех симметричных систем по расчетным схемам, составленным для одной из фаз, и определяются полные фазные токи и напряжения.

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; & \dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0}; & \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0}; & \dot{U}_C &= \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0}; \end{aligned} \quad (1.17)$$

Таким образом, вместо одной схемы рассчитываются три, но значительно более простые, что в конечном итоге существенно упрощает вычисления. На рис. 1.21 приведены векторные диаграммы систем симметричных составляющих:



Векторные диаграммы систем симметричных составляющих:

- а) – прямой последовательности; б) – обратной последовательности;
в) – нулевой последовательности

В нормальном симметричном режиме, а также при симметричном КЗ, полные токи и напряжения равны току и напряжению прямой последовательности. Составляющие обратной и нулевой последовательностей в симметричном режиме равны нулю.

Составляющие обратной последовательности возникают при появлении в сети любой несимметрии: однофазного или двухфазного КЗ, обрыва фазы, несимметрии нагрузки. Наибольшие значения ток и напряжение обратной последовательности имеют в месте несимметрии.

Составляющие нулевой последовательности появляются при КЗ на землю (однофазных и двухфазных), а также при обрыве одной или двух фаз. При междуфазных КЗ без земли (двухфазных и трехфазных) токи и напряжения нулевой последовательности равны нулю.

Падения напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности образуются от протекания токов лишь соответствующих последовательностей. Каждый элемент системы обладает соответствующим значением сопротивления для каждой последовательности токов. Сопротивления прямой последовательности всех элементов сети представляют собой обычные сопротивления этих элементов в симметричном режиме.

Для трансформатора, так как его обмотки неподвижны друг относительно друга, сопротивления самоиндукции и взаимоиндукции обмоток его сопротивление не зависит от порядка чередования фаз. Поэтому, его сопротивления прямой и обратной последовательностей равны: $z_1 = z_2$. Это справедливо так же для воздушных и кабельных линий. Значение сопротивления нулевой последовательности трансформатора z_0 зависит от его конструкции и схемы соединения обмоток. Токи нулевой последовательности могут протекать в трансформатор только со стороны обмотки Y_0 , нейтраль которой заземлена, или при наличии нулевого провода, так как только в этом случае может существовать замкнутый контур для токов одинакового направления.

При соединении обмоток в трансформатора в треугольник токи нулевой последовательности могут протекать только в фазах этой обмотки, если эти токи протекают по другой обмотке, соединенной в Y_0 . Однако ни протекать из сети, ни проникать в сеть из обмоток трансформатора, соединенных в треугольник, токи нулевой последова-

тельности не могут. Это следует из того положения, что линейные токи, равные разности двух фазных токов, не могут содержать составляющих нулевой последовательности, которые совпадают по направлению и равны по величине в каждой фазе.

В обмотках трансформатора, соединенных звездой, токи нулевой последовательности вообще протекать не могут, не зависимо от схемы соединения другой обмотки.

Протекание токов нулевой последовательности в обмотках трансформатора сопровождается образованием магнитных потоков нулевой последовательности в его магнитопроводе. В трехфазных пятистержневых трансформаторах, в бронеовых и в группах однофазных трансформаторов потоки нулевой последовательности свободно замыкаются через магнитопровод трансформатора. В трехфазных трехстержневых трансформаторах магнитные потоки нулевой последовательности могут замыкаться лишь через масло, воздух и кожух трансформатора, что значительно снижает сопротивление намагничивания.

При схеме соединения обмоток трансформатора Y_0/Δ и протекании в обмотке ВН токов нулевой последовательности, эти токи будут протекать и во вторичной обмотке, соединенной в Δ . Пренебрегая сопротивлением намагничивания, получим, что сопротивление нулевой последовательности равно сопротивлению прямой последовательности: $Z_0 = Z_1$. В обмотке соединенной Δ токи нулевой последовательности замыкаются и в фазных проводах не протекают.

При схеме соединения обмоток Y/Δ , токи нулевой последовательности протекать не могут, и сопротивление нулевой последовательности трансформатора $z_0 = \infty$.

При схеме соединения обмоток трансформатора Y/Y_0-12 , сопротивление нулевой последовательности, как указывалось выше, зависит от конструкции трансформатора (трехстержневой, или пятистержневой): $z_0 \approx z_1/2 + z_{0\text{нам}}$.

Сопротивление нулевой последовательности воздушных линий обуславливается магнитными потоками, сцепленными с проводами линии и с цепями, служащими «обратным проводом» для токов нулевой последовательности (земля и заземленные тросы).

. Расчет трехфазного короткого замыкания

Изменение тока при КЗ. Рассчитать трехфазное КЗ — это, значит, определить токи и напряжения при этом виде повреждения как в точке КЗ, так и в отдельных ветвях и узлах схемы. Ток в процессе КЗ не остается постоянным, а изменяется, как показано на рис. 1.22; ток, увеличившийся в первый момент времени, затухает до некоторого значения, а затем под действием автоматического регулятора возбуждения (АРВ) достигает установившегося значения.

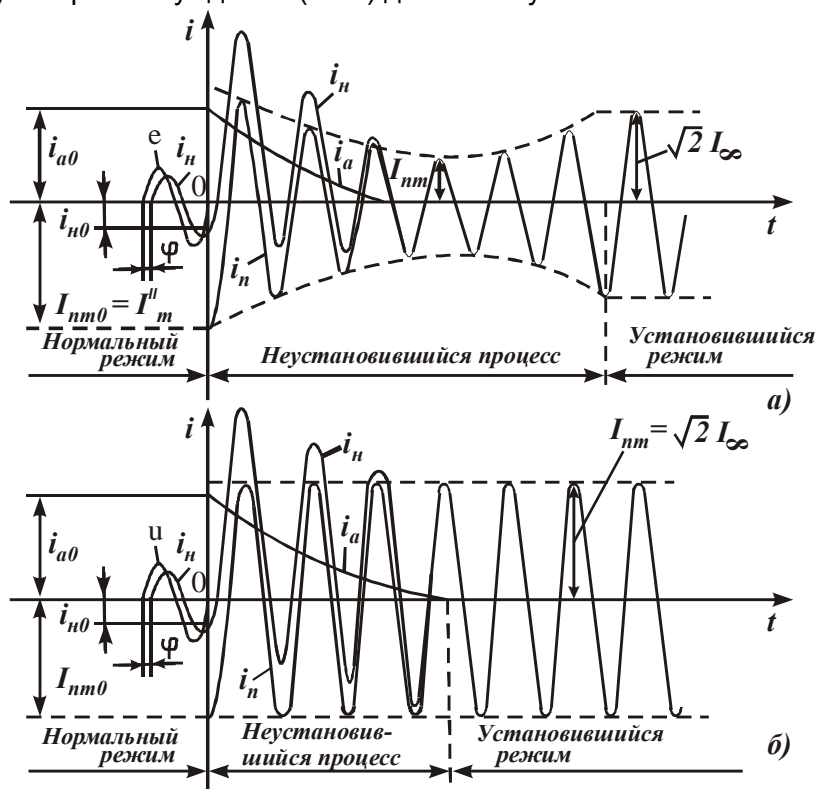


Рис. 1.22. Кривые изменения тока трехфазного КЗ;

а) – в сети, питающейся от генератора с АРВ;

б) – в сети, питающейся от системы неограниченной мощности.

Промежуток времени, в течение которого происходит изменение значения тока КЗ, определяет продолжительность переходного процесса. После того как изменение значения тока прекращается, до момента отключения КЗ продолжается установившийся режим КЗ. В зависимости от назначения выполняемого расчета (выбор уставок релейной защиты или проверка электрооборудования на термическую и электродинамическую стойкость) нас могут интересовать значения тока в разные моменты времени КЗ. Из-за наличия в сети индуктивных сопротивлений, препятствующих мгновенному изменению тока при возникновении КЗ, значение тока нагрузки I_H не изменяется скачком, а нарастает по определенному закону от нормального до аварийного значения. Для упрощения расчета и анализа ток, проходящий во время переходного процесса КЗ, рассматривают как состоящий из двух составляющих: апериодической и периодической.

Апериодической называется постоянная по знаку составляющая тока i_a , которая возникает в первый момент КЗ и сравнительно быстро затухает до нуля (рис. 1.22).

Периодическая составляющая тока КЗ в начальный момент времени $I_{пто}$ называется начальным током КЗ. Начальный ток КЗ называют также сверхпереходным i_n , так как для его определения в схему замещения вводятся сверхпереходные сопротивления генератора x''_d и ЭДС E''_d .

Значение начального тока КЗ используют, как правило, для выбора уставок и проверки чувствительности релейной защиты.

Установившимся называется периодический ток КЗ после окончания переходного процесса, обусловленного затуханием апериодической составляющей и действием АРВ.

. Методика расчета токов короткого замыкания в сетях 6-35 кВ

Расчет производится на основании схемы замещения, для которой должны быть рассчитаны все элементы.

Активные и реактивные сопротивления линий электропередачи 6-35 кВ соизмеримы, поэтому при расчете токов короткого замыкания учитываются как активные, так и реактивные сопротивления. Эти величины можно рассчитать, зная тип, длину и сечение линии, используя справочники. В приложении приводятся справочные данные по электрическим параметрам ряда наиболее часто применяемых типов линий. Эти данные удельные. Величины активного и реактивного сопротивления участка линии получаются умножением удельных параметров линии на их длину в км.

Активные и реактивные сопротивления трансформатора определяются по его паспортным данным, в ряде случаев, из-за отсутствия паспорта, приходится брать эти данные по ГОСТу.

В приложении П4 приведены эти данные для ряда трансформаторов в соответствии с ГОСТом на трансформатор.

Эти данные для двухобмоточных трансформаторов определяются по выражениям:

$$Z_{mp} = \frac{U_k \cdot U_{mp}^2}{S_{mp}} \quad (1.18)$$

где: Z_{mp} – полное сопротивление трансформатора в Ом;

U_k – напряжение короткого замыкания в относительных величинах (%);

U_{mp} – номинальное напряжение стороны ВН трансформатора в кВ;

S_{mp} – номинальная мощность трансформатора в мВА.

$$R_{mp} = \frac{P_k \cdot U_{mp}^2}{S_{2mp}} \quad (1.19)$$

где: R_{mp} – активное сопротивление трансформатора в Ом;

P_k – потери короткого замыкания при номинальном токе трансформатора в Вт;

U_{mp} – номинальное напряжение стороны ВН трансформатора в кВ;

S_{mp} – номинальная мощность трансформатора в кВА.

$$X_{mp} = \sqrt{(Z_{mp}^2 - R_{mp}^2)} \quad (1.20)$$

В большинстве случаев для практических расчетов можно пренебречь активным сопротивлением трансформатора, его сопротивление принимается равным Z и считается реактивным (X). Исключение: трансформаторы напряжением 6-35 кВ с алюминиевыми обмотками.

При расчете токов КЗ за трансформаторами с РПН, имеющих большой диапазон переключения ответвлений, следует учесть изменение сопротивления при изменении коэффициента трансформации, см. приложение П4.

Сопротивление источника питания определяется по величине тока КЗ на шинах, от которых отходит защищаемая линия. Эти токи известны из расчета уставок трансформатора.

$$X_{ш} = \frac{U_{ш}}{\sqrt{3} \cdot I_{КЗ}} \quad (1.21)$$

где: $X_{ш}$ – реактивное сопротивление на шинах в Ом;

$U_{ш}$ – напряжение на шинах (номинальное напряжение питающего трансформатора);

$I_{КЗ}$ – ток КЗ на шинах.

Должны быть выполнены расчеты для минимального и максимального режима.

После выполнения расчетов для всех участков линии и питаемых трансформаторов строится схема замещения:

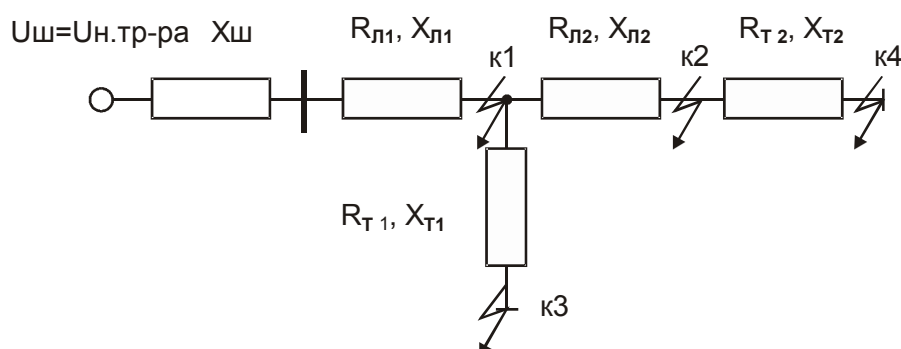


Рис.1.23. Расчетная схема замещения.

Для определения тока КЗ в нужной точке, необходимо сложить отдельно активные и реактивные сопротивления всех участков до точки КЗ. Затем сложить геометрически суммарные активные и реактивные сопротивления. По полученному полному сопротивлению Z_k определить ток КЗ. Например для точки К4:

$$X_{k4} = X_{ш} + X_{л1} + X_{л2} + X_{т2}$$

$$R_{k4} = R_{л1} + R_{л2} + R_{т2} \quad X_{k4} = \sqrt{X_{k4}^2 + R_{k4}^2}$$

$$I_{k4} = \frac{U_{ш}}{\sqrt{3} \cdot Z_{k4}}$$

. Методика расчетов токов КЗ для выбора уставок трансформатора

Для расчета токов короткого замыкания необходимо собрать следующие данные:

Сопротивление источника питания на шинах, куда подключен трансформатор, в максимальном и минимальном режиме. Обычно задается величина тока или мощности короткого замыкания.

Сопротивление источника питания по величине тока КЗ на шинах определяется по формуле:

$$Z_{ш} = \frac{U_{ш}}{\sqrt{3} \cdot I_{КЗ}} \quad (1.22)$$

где:

$Z_{ш}$ – реактивное сопротивление на шинах в Ом;

$U_{ш}$ – напряжение на шинах (номинальное напряжение питающего трансформатора) в кВ;

$I_{КЗ}$ – ток КЗ на шинах в кА.

Сопротивление источника питания по величине мощности КЗ на шинах определяется по формуле:

$$Z_{ш} = \frac{U_{ш}^2}{S_{КЗ}} \quad (1.23)$$

где:

$Z_{ш}$ – реактивное сопротивление на шинах в Ом;

$U_{ш}$ – напряжение на шинах (номинальное напряжение питающего трансформатора) в кВ;

$S_{КЗ}$ – мощность КЗ на шинах в МВт.

Активные и реактивные сопротивления трансформатора определяются по его паспортным данным, в ряде случаев, из-за отсутствия паспорта, приходится брать эти данные по ГОСТу.

В паспорте трансформатора приводится напряжение короткого замыкания U_k в %, которое указывает, какое напряжение будет на выводах трансформатора при токе КЗ за трансформатором равном номинальному.

Для двухобмоточных трансформаторов эти данные определяются по выражениям:

$$Z_{mp} = \frac{U_k \cdot U_{mp}^2}{S_{mp}} \quad (1.24)$$

где:

Z_{mp} – полное сопротивление трансформатора в Ом;

U_k – напряжение короткого замыкания в относительных величинах;

U_{mp} – номинальное напряжение стороны ВН трансформатора в кВ;

S_{mp} – номинальная мощность трансформатора в МВА.

$$R_{mp} = \frac{P_k \cdot U_{mp}^2}{S_{2mp}} \quad (1.25)$$

где:

R_{mp} – активное сопротивление трансформатора в Ом;

P_k – потери короткого замыкания при номинальном токе трансформатора в Вт;

U_{mp} – номинальное напряжение стороны ВН трансформатора в кВ;

S_{mp} – номинальная мощность трансформатора в МВА.

Реактивное сопротивление трансформатора:

$$X_{k4} = \sqrt{Z_{mp}^2 - R_{mp}^2} \quad (1.26)$$

В большинстве случаев для практических расчетов можно пренебречь активным сопротивлением трансформатора, его сопротивление принимается равным Z и считается реактивным (X). Исключение: трансформаторы напряжением 6-35 кВ с алюминиевыми обмотками.

Сопротивление короткого замыкания трансформатора зависит от величины его коэффициента трансформации. Особенно сильно выражается эта зависимость на трансформаторах с РПН. Поэтому, в паспорте трансформатора указываются три величины напряжения короткого замыкания: для минимального, среднего и максимального положения переключателя.

Для трехобмоточных трансформаторов схема замещения состоит из трех сопротивлений обмоток ВН, СН и НН, соединенных в «звезду» см. рис 1.23.

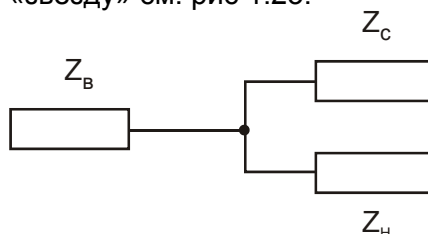


Рис 1.24 Схема замещения трехобмоточного трансформатора.

Напряжения короткого замыкания даются суммарно для каждой пары обмоток. Поэтому, после определения сопротивления каждой пары обмоток, их нужно пересчитать в сопротивления отдельных обмоток по формулам:

$$Z_B = \frac{Z_{BC} + Z_{BH} - Z_{CH}}{3} \quad (1.27)$$

$$Z_C = \frac{Z_{BC} + Z_{CH} - Z_{BH}}{3} \quad (1.28)$$

$$Z_H = \frac{Z_{BH} + Z_{CH} - Z_{BC}}{3} \quad (1.29)$$

Для трансформаторов с расщепленной обмоткой НН схема замещения также состоит из трех сопротивлений обмоток ВН, НН₁ и НН₂, соединенных в «звезду». Однако в паспорте приводится только одно напряжение короткого замыкания $U_k\%$. Оно соответствует режиму короткого замыкания за двумя, соединенными параллельно обмотками низкого напряжения. После его пересчета в сопротивление, сопротивления отдельных обмоток считаются по формулам:

$$Z_B = 0,125 \cdot Z_{BH} \quad (1.30)$$

$$Z_{H1} = Z_{H2} = 1,75 \cdot Z_{BH} \quad (1.31)$$

Для трансформаторов имеющих большой диапазон изменения коэффициента трансформации (с РПН) необходимо учитывать изменения величины тока КЗ при регулировании и рассчитывать токи КЗ для среднего и крайних положений переключателя.

Ток КЗ рассчитывается по формуле:

$$I_{K3} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} \quad (1.32)$$

где:

$U_{ном}$ – номинальное напряжение, принимается напряжение среднего положения переключателя трансформатора или 1,05 соответствующей ступени напряжения. (230, 115, 38,5 кВ и т.д.);

Z_{K3} – сопротивление короткого замыкания, равное сумме сопротивлений системы на стороне ВН, сопротивления обмотки ВН и обмотки за которой выполняется короткое замыкание:

$$Z_{K3} = Z_C + Z_B + Z_H(c) \quad (1.33)$$

Учет всего диапазона регулирования приводит к значительной разнице токов в крайних положениях переключателя. Например для одного из трансформаторов 25 МВА токи короткого замыкания отличаются в крайних положениях почти в 2 раза: 833 – 480 А, при средней величине тока КЗ – 578 А. Из-за такой разницы токов, для обеспечения необходимой чувствительности пришлось применить блокировку по напряжению для максимальных защит трансформатора. Реальный диапазон положений переключателя значительно уже и при его учете токи будут отличаться меньше, что позволит применить простую максимальную защиту. Заводом и ГОСТом обычно даются 3 величины сопротивления: для среднего и обоих крайних положений. Величина сопротивления для какого либо промежуточного положения, определяется методом линейной интерполяции, т.е. изменение величины сопротивления пропорционально отклонению напряжения от среднего положения переключателя.

. Особенности расчета ТКЗ трансформаторов 10 / 0.4кВ

При расчете учитываются рекомендации «Методических указаний по расчету токов короткого замыкания в сети напряжением до 1 кВ электростанций и подстанций с учетом влияния электрической дуги» ОРГРЭС 1993 год.

При расчете токов короткого замыкания на стороне 0.4кВ необходимо учитывать некоторые данные, ряд которых не учитываются при расчете ТКЗ на более высоких напряжениях:

- индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, включая проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей;
- активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи;
- активные сопротивления контактов и контактных соединений;
- токоограничивающее влияние электрической дуги;
- значения параметров асинхронных электродвигателей, если их суммарный номинальный ток превышает 10% номинального значения периодической составляющей тока КЗ в месте КЗ, рассчитанного без учета влияния электродвигателей.

Кроме того, при расчетах токов КЗ рекомендуется учитывать изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева при КЗ.

При расчетах токов КЗ допускается не учитывать:

- ток намагничивания трансформаторов;
- насыщение магнитных систем электрических машин;
- влияние асинхронных электродвигателей, если их суммарный номинальный ток не превышает 10% начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей;

- сопротивление внешней энергосистемы при расчете токов металлического КЗ в силовых сборках, сборках задвижек, а также КЗ за отходящими от сборок и шин кабелями;
- сопротивление внешней энергосистемы при расчете всех видов дугового КЗ;
- влияние асинхронных электродвигателей при расчете всех видов дуговых КЗ.

Коэффициенты трансформации трансформаторов допускается принимать равными отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения, которые связывают трансформаторы. При этом следует использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений:

37; 24; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23 кВ.

Определение параметров элементов сети

Расчет токов КЗ в сети напряжением до 1 кВ целесообразно проводить в именованных единицах.

При составлении эквивалентных схем замещения следует в качестве основной ступени выбирать ступень пониженного напряжения, как правило, 0,4 кВ, а активные и индуктивные сопротивления всех элементов схемы замещения выражать в миллиомах (мОм).

Сопротивление внешней системы включает в себя сопротивление прилегающей части энергосистемы на стороне высокого напряжения рабочего или резервного трансформатора питания РУ 6 (10) кВ, сопротивление собственно трансформаторов рабочего и резервного питания РУ 6 (10) кВ, а также сопротивление шинопроводов или кабельных связей, по которым осуществляется ввод рабочего или резервного питания на шины секций РУ 6 (10) кВ. Сопротивление (в миллиомах) прилегающей части энергосистемы (X_C) может быть определено при известном значении тока трехфазного КЗ на стороне высокого напряжения по формуле 2.1:

$$X_C = \frac{U_{ср.ни}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{КЗвн} \cdot U_{ср.вн}} = \frac{U_{ср.ни}^2 \cdot 10^{-3}}{S_{КЗ}} \quad (1.34)$$

где:

$U_{ср.ни}$ – среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора, В;

$I_{КЗвн}$ – действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, кА;

$U_{ср.вн}$ – среднее номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка низшего напряжения трансформатора, В;

$S_{КЗ}$ – мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора МВА.

Активное (R_T) и индуктивное сопротивления (X_T) (в миллиомах) трансформаторов 0,4 кВ, приведенные к ступени низшего напряжения, следует определять по формулам:

$$R_T = \frac{P_{КЗ} \cdot U_{нн. ном.}^2}{S_{Т. ном.}^2} \cdot 10^6 \quad (1.35)$$

$$X_T = \frac{U_{КЗ} \cdot U_{нн. ном.}^2}{100 S_{Т. ном.}} \quad (1.36)$$

где: $U_{КЗ}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$P_{КЗ}$ – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;

$U_{нн. ном.}$ – номинальное линейное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;

$S_{Т. ном.}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме Δ/Y_0 (треугольник – звезда с заземленным нулем), практически равны соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности. При соединении обмоток трансформаторов по схеме Y/Y_0 (звезда – звезда с заземленным нулем) активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности значительно больше соответствующих сопротивлений прямой последовательности и имеют значительный разброс, вследствие чего наиболее достоверные результаты могут быть получены путем непосредственного измерения этих сопротивлений для каждого конкретного трансформатора.

В литературе имеются расчетные результаты и замеры сопротивлений подобных трансформаторов. Данные в таблицах приводятся в 2-х видах:

Отдельно дается X_1, R_1, X_0, R_0 . По этим данным расчет ТКЗ ведутся методом симметричных составляющих:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{U_\phi}{\sqrt{(2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2}} \quad (1.37)$$

$$I_{K3}^{(1)} = I_1 + I_2 + I_0 \quad (1.38)$$

Дается величина « $\frac{1}{3} Z_T^{(1)}$ », которая равняется:

$$\frac{1}{3} Z_T^{(1)} = \frac{1}{3} \sqrt{(2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2} \quad (1.39)$$

Расчет ТКЗ производится по формуле:

$$I_{K3}^{(1)} = \frac{U_\phi}{\frac{1}{3} \cdot Z_T^{(1)}} \quad (1.40)$$

При расчете по формуле 1.40 получаем непосредственно ток однофазного КЗ.

Данные некоторых трансформаторов приведены в приложении 4.

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора схемы Δ/Y_0 равно сопротивлению прямой и токи КЗ при однофазном и трехфазном замыкании одинаковы.

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора схемы Y/Y_0 значительно, больше чем прямой последовательности. Вследствие этого, при однофазных коротких замыканиях токи КЗ меньше и этот режим является расчетным при проверке чувствительности защиты.

Переходное активное сопротивление контактов в короткозамкнутой цепи для упрощенных расчетов рекомендуется принять равным 15 мОм. Это соизмеримо с сопротивлением трансформаторов и рассчитанный таким образом ток на трансформаторах 1000кВА получается в 2 раза меньше, чем при металлическом КЗ. Более точные результаты можно получить учетом сопротивлений всех элементов входящих в цепь КЗ. В упомянутой методике приводятся данные по некоторым видам аппаратуры, контрольных кабелей и токопроводов.

Учет сопротивления электрической дуги. Наиболее вероятная величина действующего значения периодической составляющей тока трехфазного дугового замыкания определяется по формуле:

$$I_{дуг.} = I_{нм} \cdot K_C \quad (1.41)$$

где:

$I_{нм}$ – периодическая составляющая тока металлического КЗ с учетом активных и реактивных составляющих всех элементов;

K_C – коэффициент снижения тока КЗ под действием электрической дуги. Величина K_C определяется по характеристике приведенной на рисунке 1.25.

Из рисунка видно, что коэффициент снижения тока КЗ зависит от величины сопротивления цепи КЗ и времени протекания ТКЗ. При определении тока дугового замыкания в начальный момент замыкания $t_{кз} < 0.05$ с значение K_C определяется по кривой 1: $K_C = f(Z_{кз})$. При определении установившегося значения тока дугового замыкания $t_{кз} > 0.05$ с K_C определяется по кривой 2.

Расчет дугового КЗ для разных видов КЗ производится отдельно для однофазного, двухфазного, трехфазного КЗ. При этом берется вычисленная величина однофазного, двухфазного и трехфазного тока металлического КЗ.

Сопротивление цепи КЗ определяется по формулам:

$$\text{– трехфазное КЗ} \quad - \quad Z_{K3}^{(3)} = \sqrt{X_{1\Sigma}^2 + R_{1\Sigma}^2} \quad (1.42)$$

$$\text{– двухфазное КЗ} \quad - \quad Z_{K3}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{X_{1\Sigma}^2 + R_{1\Sigma}^2} \quad (1.43)$$

$$\text{– однофазное КЗ} \quad - \quad Z_{K3}^{(1)} = \frac{1}{3} \sqrt{(2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2 + (2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2} \quad (1.44)$$

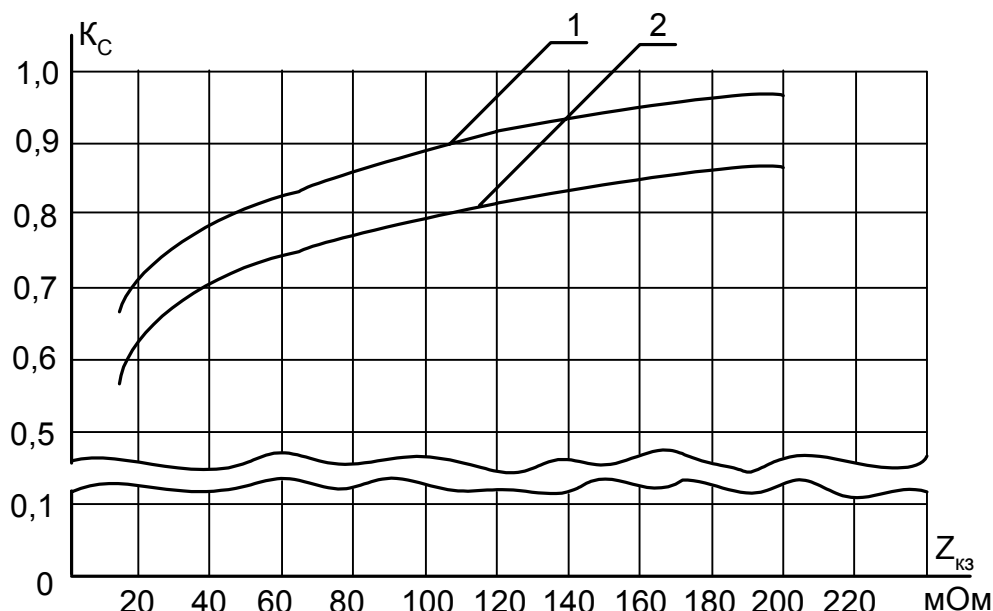


Рис. 1.25 Кривые зависимости K_c от сопротивления цепи КЗ.
Кривая 1 – начало дугового замыкания $t_{кз} < 0.05$ сек,
Кривая 2 – установившийся процесс короткого замыкания.

Учет увеличения активного сопротивления кабеля при его нагреве

Увеличение активного сопротивления кабеля целесообразно учитывать при расчете тока КЗ за кабелем при определении минимальных токов КЗ:

$$R_v = C_v \cdot R \quad (1.45)$$

где:

C_v – коэффициент учитывающий увеличение активного сопротивления кабеля при его нагреве электрическим током. Для упрощенных расчетов можно принять C_v равным 1.5, предполагая нагрев кабеля до предельно возможной величины;

R – активное сопротивление кабеля при температуре $+20^\circ$.

Предложения по расчету ТКЗ для выбора уставок защиты трансформаторов

При расчете всех видов КЗ для отстройки защит от КЗ за трансформатором используется ток металлического короткого замыкания за трансформатором.

При расчете токов КЗ для проверки чувствительности защит при КЗ за трансформатором мощностью 400кВА и менее используется ток короткого замыкания за трансформатором с добавлением в цепь переходного сопротивления 15мОм и нормированным коэффициентом чувствительности. При использовании тока металлического короткого замыкания за трансформатором, коэффициент чувствительности защиты должен быть не менее 2.

При расчете токов КЗ для проверки чувствительности защит при КЗ за трансформатором мощностью 630 кВА и более необходимо производить подробный расчет с учетом сопротивления элементов цепи и сопротивления дуги.

Учет роста сопротивления кабеля при нагреве токами короткого замыкания производится при расчете токов КЗ в конце кабелей 0.4кВ для проверки чувствительности защиты.

Пересчет токов КЗ на сторону ВН

Рекомендации по расчету ТКЗ, указанные выше, относились к стороне низкого напряжения. Для выбора уставок защиты на стороне ВН, эти токи должны быть пересчитаны на сторону ВН. При этом следует учесть особенности, связанные с группой соединения обмоток трансформатора. Наиболее распространенными группами являются треугольник – звезда с заземленным нулем ($\Delta/Y_0 -11$), звезда – треугольник ($Y/\Delta -11$), и звезда – звезда с заземленным нулем ($Y/Y_0 -12$). Токи трехфазного КЗ пересчитываются через коэффициент трансформации трансформатора.

$$I_{вн}^{(3)} = \frac{I_{нн}^{(3)}}{k_T} \quad (1.46)$$

Для простоты условно принимаем коэффициент трансформации трансформатора $k_T = 1$. При этом отношение линейных токов обмоток с соединением Y и Δ равно 1, а токов в фазах равно:

$$I_Y/I_\Delta = w_\Delta/w_Y = \sqrt{3} \quad \text{или} \quad w_\Delta = \sqrt{3}w_Y \quad (1.47)$$

Для трансформатора со схемой Δ/Y_0 фазные токи стороны треугольника ВН связаны с токами стороны звезды следующим выражением:

$$I_{A\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{AY} - I_{BY}); \quad I_{B\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{BY} - I_{CY}); \quad I_{C\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{CY} - I_{AY}); \quad (1.48)$$

При двухфазном КЗ между фазами В и С ток КЗ в фазе А со стороны звезды отсутствует.

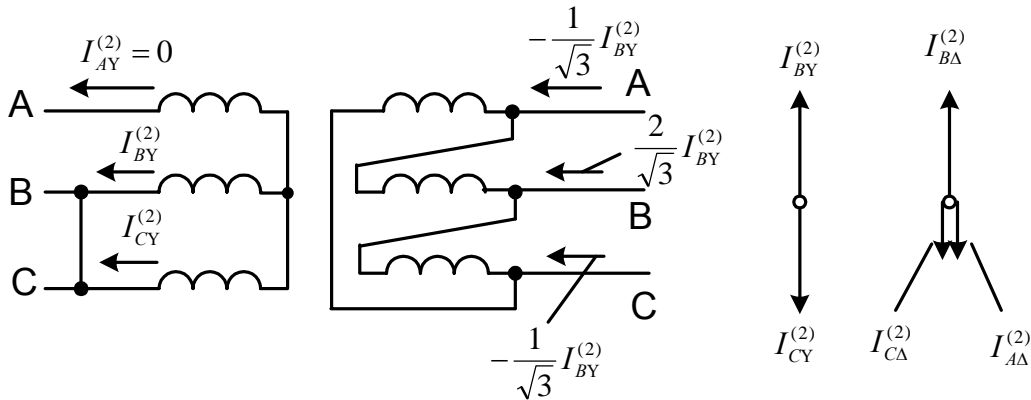


Рис.1.26 Распределение токов при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой соединений Δ/Y и $k_T = 1$

$$I_{AY} = 0, \text{ поэтому, } I_{CY} = -I_{BY}$$

$$I_{A\Delta}^{(2)} = -\frac{1}{\sqrt{3}}I_{BY}^{(2)}; \quad I_{B\Delta}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}}I_{BY}^{(2)}; \quad I_{C\Delta}^{(2)} = -\frac{1}{\sqrt{3}}I_{CY}^{(2)} \quad (1.49)$$

Таким образом, при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой Δ/Y между фазами В и С звезды (рис. 1.26) на стороне треугольника токи КЗ проходят во всех трех фазах. Причем, в одной фазе течет ток в два раза больше, чем ток двух других фаз, и в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раз больший тока

$I_{KЗY}$ и совпадает с ним по фазе.

Аналогичный результат получится и при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой Y/Δ -11 (рис. 1.27). При двухфазном КЗ за трансформатором со схемой Y/Δ (рис.1.27) между фазами В и С треугольника в этих фазах протекает ток КЗ, в фазе А ток КЗ отсутствует. На стороне Y токи КЗ проходят во всех трех фазах звезды, причем, в одной фазе течет ток в два раза больше, чем ток двух других фаз и в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раз больший $I_{KЗ\Delta}$.

При однофазном КЗ за трансформатором со схемой соединения обмоток Y/Y (рис.1.28) по стороне НН ток проходит только в поврежденной фазе А, и имеет значение:

$$I_A^{(1)} = I_{1A} + I_{2A} + I_{0A}; \quad \text{где } I_{1A} = I_{2A} = I_{0A} \quad (1.50)$$

Токи I_0 не могут протекать в обмотке ВН, соединенной в звезду, поэтому, в одноименной фазе будет протекать ток равный $\frac{2}{3}I_A^{(1)}$, а в двух других фазах $\frac{1}{3}I_A^{(1)}$.

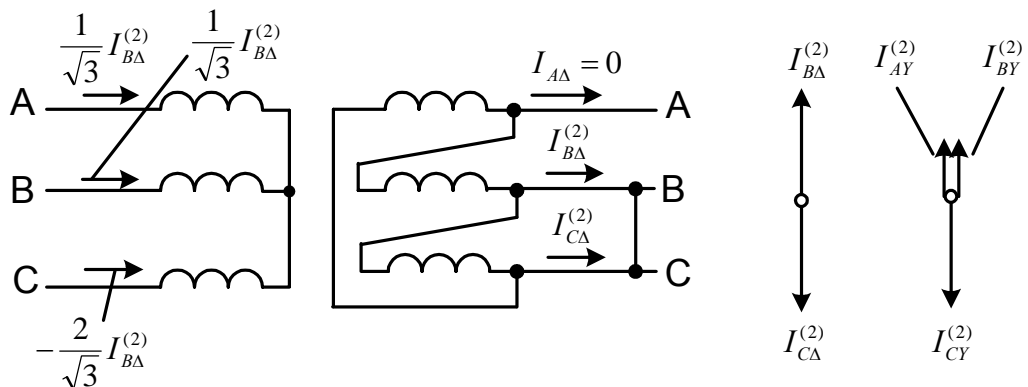


Рис. 1.27 Распределение токов при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой соединений Y/Δ -11 и $k_T = 1$

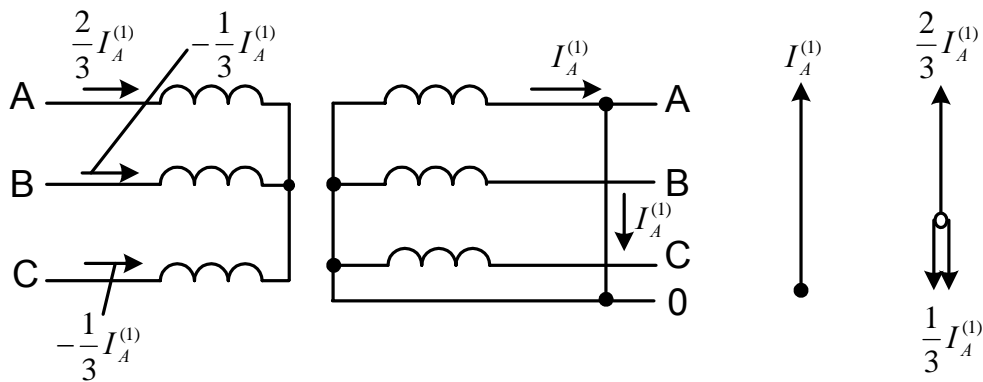


Рис.1.28. Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором со схемой соединений Y/Y и $k_T = 1$

При однофазном КЗ за трансформатором со схемой обмоток Δ/Y (рис.1.29) ток $I_{AY}^{(1)}$ на стороне НН течет только в фазе А, $I_{BY}^{(1)} = I_{CY}^{(1)} = 0$. Со стороны треугольника ВН токи проходят в двух фазах - А и С, они составляют:

$$I_{AA}^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{AY}^{(1)}; \quad I_{BA}^{(1)} = 0; \quad I_{CA}^{(1)} = -\frac{1}{\sqrt{3}} I_{AY}^{(1)} \quad (1.51)$$

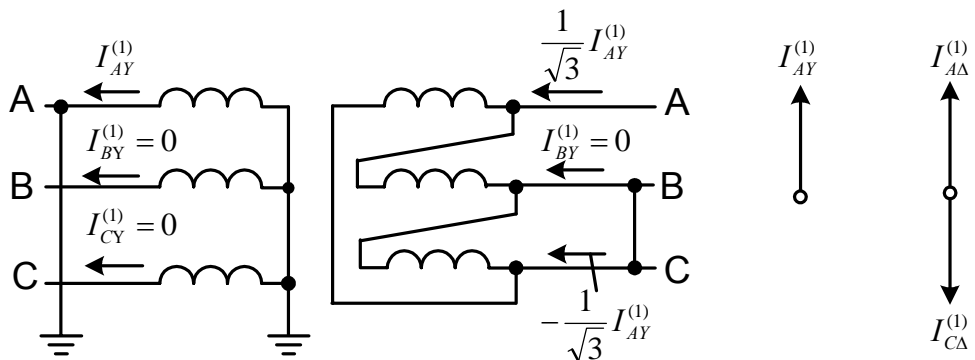


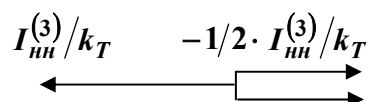
Рис.1-29. Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором со схемой соединений Δ/Y и $k_T = 1$

Исходя из рассмотренных выше примеров, для практических расчетов токи проходящие в фазах трансформаторов с учетом видов КЗ, схем соединения обмоток и реальных коэффициентов трансформации трансформатора удобно рассчитывать относительно тока трехфазного КЗ. Ниже даны формулы пересчета, взятые из литературы (Л6).

Токи трехфазного КЗ пересчитываются через коэффициент трансформации трансформатора.

$$I_{вн}^{(3)} = \frac{I_{нн}^{(3)}}{k_T} \quad (1.46)$$

Токи двухфазного КЗ за трансформатором со схемой (Δ/Y_0) на стороне ВН проходят во всех трех фазах, причем в одной фазе течет ток равный току трехфазного КЗ, а в двух других текут половинки этого тока.



$$I_{внА}^{(2)} = I_{внА}^{(3)} = I_{нн}^{(3)} / k_T; \quad I_{внВ}^{(2)} = -1/2 I_{нн}^{(3)} / k_T; \quad I_{внС}^{(2)} = -1/2 I_{нн}^{(3)} / k_T; \quad I_1 = I_2 = I_{внА}^{(2)} / \sqrt{3}; \quad (1.52)$$

где I_1 и I_2 токи прямой и обратной последовательности.

Токи двухфазного КЗ за трансформатором со схемой (Y/Y_0) на стороне ВН проходят в двух фазах, одноименных с поврежденными, и по величине равны этому току.

$$\begin{array}{c}
 I_{HH}^{(2)}/k_T \qquad -I_{HH}^{(2)}/k_T \\
 \longleftrightarrow \\
 I_{вНА}^{(2)} = I_{HH}^{(2)}/k_T; I_{вНВ}^{(2)} = -I_{HH}^{(2)}/k_T; I_1 = I_2 = I_{вН}^{(2)}/\sqrt{3}; \quad (1.53)
 \end{array}$$

где I_1 и I_2 токи прямой и обратной последовательности.

При однофазном КЗ за трансформатором со схемой (Δ/Yo) на стороне ВН токи проходят по двум фазам, они равны по величине и противоположно направлены.

$$\begin{array}{c}
 I_{HH}^{(1)}/k_T \qquad -I_{HH}^{(1)}/k_T \\
 \longleftrightarrow \\
 I_{вНА}^{(1)} = \frac{I_{HH}^{(1)}}{\sqrt{3} k_T}; \quad I_{вНВ}^{(1)} = -\frac{I_{HH}^{(1)}}{\sqrt{3} k_T}; \quad I_1 = I_2 = \frac{I_{вН}^{(1)}}{\sqrt{3}} = 1/3 \cdot I_{HH}^{(1)}/k_T; \quad (1.54)
 \end{array}$$

где I_1 и I_2 токи прямой и обратной последовательности.

Токи однофазного КЗ за трансформатором со схемой (Y/Yo) на стороне ВН проходят во всех трех фазах, причем в одной фазе течет ток равный 2/3 тока однофазного КЗ, а в двух других текут половинки этого тока.

$$\begin{array}{c}
 2/3 \cdot I_{HH}^{(1)}/k_T \qquad -1/3 \cdot I_{HH}^{(1)}/k_T \\
 \longleftrightarrow \\
 I_{вНА}^{(1)} = 2/3 \cdot I_{HH}^{(1)}/k_T; \quad I_{вНВ}^{(1)} = -I_{HH}^{(1)}/k_T/3; \quad I_{вНС}^{(1)} = -I_{HH}^{(1)}/k_T/3; \quad I_1 = I_2 = I_{вНА}/2; \quad (1.55)
 \end{array}$$

где I_1 и I_2 токи прямой и обратной последовательности.

1.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЭВМ ДЛЯ РАСЧЕТА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Как видно из раздела 1.4, расчеты вручную требуют значительных трудозатрат. По этим причинам после появления ЭВМ, а далее ПЭВМ начались попытки применить их для расчета уставок релейной защиты. Эти программы для распределителей были относительно простыми и разрабатывались непосредственно теми, кто занимался расчетами на любительском уровне. Для разработки программ использовались алгоритмические языки программирования: Бейсик, Фортран, Паскаль, Дельфи и т.д. Для выполнения даже сложных профессиональных программ можно использовать любые имеющиеся ПЭВМ, начиная с I-386 серии. В дальнейшем к разработке программ подключились профессионалы, и простые программы превратились в сложные комплексы программ, позволяющие автоматизировать выполнение всех этапов расчета: подготовку данных, расчет параметров, составление схемы замещения, расчет аварийных величин, выбор уставок защиты и сохранение результатов.

Институтом Электродинамики Украины разработан «Комплекс программ расчета аварийных режимов в сложной электрической сети объемом до 3000 узлов». В настоящее время эксплуатируется программный комплекс V-VI-50, позволяющий выполнить самые сложные расчеты в сетях любой сложности с учетом токов нагрузки, емкостных токов в сети, сложных несимметричных режимов. Этими программами оснащены все энергетические системы Украины. Этот комплекс можно применить и для расчета в распределителях, однако для этого он слишком сложен.

Аналогичные программы разработаны и внедрены Новосибирским политехническим институтом (Техническим университетом), Московским институтом «Энергосетьпроект».

Кроме того, множеством других организаций – проектных и электросетевых – разработаны и эксплуатируются собственные программы, приспособленные к их нуждам. У авторов в настоящее время отсутствуют сводные данные по возможности приобретения программ расчета ТКЗ, а также по их особенностям. Ряд этих организаций предлагает указанные программы на продажу. У авторов в настоящее время отсутствуют сводные данные по возможности приобретения программ расчета ТКЗ, а также по их особенностям. Поэтому мы рекомендуем обратиться к информации в сети «Интернет» или в ближайшей службе РЗА. При выборе необходимой программы следует четко представлять задачи, которые должна выполнять программа, и выяснить, насколько соответствует данная программа этим задачам.

Использование стандартной программы Microsoft Excel для расчета токов короткого замыкания

Для тех кто не имеет программы расчета токов короткого замыкания и не собирается ее разрабатывать с применением алгоритмических языков программирования, можем предложить способ разработки программы расчета с применением типовой программы Microsoft Excel.

Табличный процессор Microsoft Excel выбран, исходя из следующих возможностей, предоставляемых программой для не слишком сложных но объемных обычных расчетов ТКЗ в распределительных сетях:

- Вводимые данные и результаты расчетов представляются в табличной форме, занимающей мало места, которая легко вводится в текстовую программу Microsoft Word или Adobe Acrobat.
- Excel оперирует с адресами ячеек, в которые вводятся данные, формула расчета вводится в ячейку а записывается в таблицу результат расчета.
- Относительная адресация позволяет производить расчеты с другими данными используя одну и ту же формулу, занесенную в предыдущую ячейку.

Расчет ТКЗ с применением Microsoft Excel покажем на примере.

1 Основные характеристики

1.1 На рис. 1.30. представлена схема подстанции, питающейся по двум линиям 110кВ, включенным параллельно на шины 110кВ ПС. Любая ВЛ-110 может быть отключена.

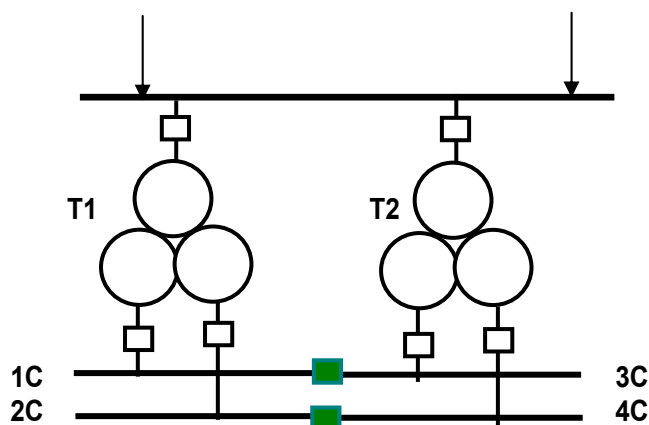


Рис 1.30 Схема подстанции.

1.2 Токи короткого замыкания на шинах подстанции:

- Обе ВЛ в работе, максимальный режим: ток трехфазного КЗ - 6кА, однофазного – 4 кА.
- В работе ВЛ-1, минимальный режим 1: ток трехфазного КЗ - 5кА, однофазного – 3 кА.
- В работе ВЛ-2, минимальный режим 2: ток трехфазного КЗ - 3кА, однофазного – 2 кА.

1.3 Нейтрали стороны 110кВ трансформаторов не заземлены.

1.4 Параметры трансформаторов ТДТН-25/110 взяты в соответствии с ГОСТ 12965-74:

- номинальная мощность стороны ВН – 25МВт, НН - 12.5МВт;
- номинальное напряжение стороны ВН - 115 кВ, регулирование 9 ступеней по 1.78%;
- номинальное напряжение расщепленной обмотки НН - 11кВ;
- напряжение U_k с учетом регулирования: 9.84%, 10.5%, 11.72% для минимального, среднего и максимального положения переключателя РПН соответственно.

1.5 На стороне 6кВ четыре секции с АВР на СВ-I-III, и СВ II-IV.

2 Расчет токов короткого замыкания.

Расчет проводится в именованных величинах, активным сопротивлением пренебрегаем.

2.1 Реактанс прямой последовательности на шинах 110кВ:

- максимальный режим: $X_{1\max} = U / (\sqrt{3} \cdot I_{k3}) = 115 / (1.73 \cdot 6) = 11 \text{ Ом};$
- минимальный режим: $X_{1\min} = 115 / (1.73 \cdot 3) = 22 \text{ ом}.$

2.2 Реактанс нулевой последовательности:

- максимальный режим: $X_{одн.} = \frac{3 \cdot U}{\sqrt{3} I_{k3одн}} = \frac{3 \cdot 115}{1.73 \cdot 4} = 49,8 \text{ Ом}$

$$X_0 = X_{одн.} - X_1 - X_2 = 49,8 - 11 - 11 = 27,8 \text{ Ом}$$

- минимальный режим: $X_{одн.} = \frac{3 \cdot 115}{1.73 \cdot 2} = 99,6 \text{ Ом}$

$$X_0 = X_{одн.} - X_1 - X_2 = 99,6 - 22 - 22 = 55,6 \text{ Ом}$$

Дальнейшие расчеты выполняем в таблице Excel см. таблицу 1.1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Табл.1.1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ТКЗ ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ								
2	1. Расчет параметров трансформатора								
3	Полож. РПН	Напр. ВН	Ток ВН	Ток НН	Напр. КЗ	ХкзВНп.	Хкз. ННп	ХкзВНр	Хкз. ННр
4	1 (U макс)	133,4	108,33	688,14	0,1172	83,43	1,03	156,42	1,938
5	10 (Усредн.)	115	125,66	688,14	0,105	55,55	0,93	104,15	1,736
6	19 (Умин)	96,6	149,59	688,14	0,0984	36,73	0,87	68,87	1,627
7	2. Расчет токов короткого замыкания								
8		1. Максимальный режим				2. Минимальный режим			
9	Полож.РПН	ХкзВНр	IkзВНр	Хкз. ННр	IkзННр	ХкзВНр	IkзВНр	Хкз. ННр	IkзННр
10	1 (U макс)	167,42	0,397	1,04	5,044	178,42	0,373	1,11	4,733
11	10 (Усредн.)	115,15	0,577	0,96	6,323	126,15	0,527	1,05	5,771
12	19 (Умин)	79,87	0,832	0,94	7,657	90,87	0,732	1,07	6,730

В первой строке таблицы в ячейке B1 записываем № таблицы, C1 – название таблицы.

Во второй строке в ячейке C2 записываем заголовок расчета.

В строке 3 будем записывать название колонки, а в колонке A название строки.

Колонка B. Выполняем расчет напряжений при крайних положениях РПН.

Ячейка B5. =G10/10,5*B4 записываем величину напряжения в среднем положении 115кВ.

Ячейка B4 – формулу для расчета напряжения в 1 положении РПН - =115+0.16*115 - после перехода в другую ячейку или нажатия Enter в ячейке получается результат: **133,4**. Если вернуться в эту ячейку снова, то в ней результат остается, а в строке формул появляется формула, по которой производился расчет.

Ячейка B6 – формулу для расчета напряжения в 19 положении РПН - =115-0.16*115 - получается результат: 96,6.

В колонке C выполняем расчет номинального тока ВН для этих положений РПН:

В ячейку C4 записываем формулу: 25000/(1,73*B4), где 25000 – номинальная мощность трансформатора, 1,73 = $\sqrt{3}$, в ячейке B4 расположено вычисленное ранее напряжение в верхнем положении РПН. Следует учитывать, что табличный процессор распознает десятичную дробь только в том случае, если дробная часть отделяется запятой. При использовании десятичной точки, как в большинстве случаев в данной книге, Excel воспринимает число как текст и вычисления производиться не будут.

Установим мышью курсор в левый нижний угол ячейки - появится малый крест. После этого при помощи мыши перетащим выделенное на 2 ячейки вниз. В этих ячейках появятся вычисленные

значения токов для других положений РПН. В данном случае мы имеем дело с относительной адресацией ячеек: при увеличении номера данной ячейки на единицу – одновременно происходит увеличение на единицу номера ячейки, которая входит в формулу и производится необходимый расчет.

В ячейке D4 выполняем расчет тока НН. Заносим формулу - $=12500/(1,73*10,5)$ – 12500 – номинальная мощность обмотки НН, 10.5 ее напряжение в кВ. получаем результат расчета: 688.14А. Копируем результат в другие ячейки – он будет одинаковым для всех положений РПН. Для копирования помещаем мышью курсор в середину ячейки – появляется большой крест и передвигаем указатель в другие 2 ячейки – в них появляется такой же результат.

В колонку E ячейки E4 – E6 заносим величину напряжения короткого замыкания для разных положений РПН.

В колонке F произведем расчет реактансов трансформатора для этих положений РПН приведенный к напряжению ВН – заносим формулу: $=B4/(1,73*C4/1000)*E4$. В ячейке B4 находится напряжение ВН в кВ, в ячейке C4 – ток ВН в амперах – делим на 1000 чтобы получить кА. в ячейке E4. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией: Установим указатель мыши в левый нижний угол ячейки - появится малый крест. После этого перетащим его на 2 ячейки вниз, появятся результаты расчета в ячейках.

В колонке G выполним расчет реактанса приведенный к напряжению НН. Вводим формулу: $10,5*E4/(1,73*(D4/1000))$ – в ячейке E4 - величина напряжения короткого замыкания, D4 номинальный ток стороны 10кВ. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Рассчитанные реактансы относятся к режиму короткого замыкания сразу на 2 сторонах НН – данные U_k даются для параллельной работы. Трансформатор работает отдельно, поэтому полученные параметры должны быть пересчитаны для режима отдельной обмотки. Для этого умножим полученный результат на 1,875. Введем формулу $=F4*1,875$ для ячейки H4. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Введем формулу $=F4*1,875$ для ячейки H4. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Введем формулу $=G4*1,875$ для ячейки I4. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Расчет параметров закончен и перейдем к расчету ТКЗ на стороне НН. Продолжаем ту же таблицу.

В ячейку C7 заносим заголовок: **2.Расчет токов короткого замыкания.**

В ячейку B8 - заголовок: **1. Максимальный режим.** В ячейку F8 - заголовок: **Минимальный режим.**

В ячейки A9-A12 копируем заголовки из ячеек A3-A6.

Колонка B10 – B12. Расчет реактанса КЗ на стороне НН в максимальном режиме. К реактансу трансформатора добавляется реактанс системы в максимальном режиме.

Введем формулу $=11+H4$ для ячейки B10. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Колонка C10 – C12. Расчет ТКЗ на стороне НН в максимальном режиме. Введем формулу $=115/(1,73*B10)$ для ячейки C10. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Колонка D10 –D13. Расчет реактанса КЗ на стороне НН в максимальном режиме приведенный к стороне НН. Реактанс пересчитывается через отношение квадратов напряжения сторон НН и ВН трансформатора. Введем формулу $=B10*СТЕПЕНЬ(10,5;2)/СТЕПЕНЬ(B4;2)$ для ячейки D10. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Колонка E10 – E12. Расчет ТКЗ на стороне НН в максимальном режиме. приведенный к стороне НН. Ток ВН пересчитывается через отношение напряжений ВН и НН. Введем формулу

=C10/10,5*B4 для ячейки C10. Переносим формулу в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Повторяем результаты расчета для минимального режима. Для этого копируем колонки интервала (B10 - B12) - (E10 –E12) в колонки интервала (F9 – F12) – (I9 – I12).

После этого в ряду 10 изменяем формулы в ячейках F10 (=22+B10), G10 (=115/(1,73*F10), H10 (F10*СТЕПЕНЬ(10,5;2)/СТЕПЕНЬ(B4;2), I10 (=G10/10,5*B4). Для того чтобы изменить реактанс максимального режима на минимальный и восстановить измененные в результате переноса адреса. Переносим формулы в другие ячейки колонки с относительной адресацией. Появятся результаты расчета в ячейках.

Вместо копирования и изменения формул можно заполнить эти графы формулами самостоятельно, при этом время работы увеличится.

После окончания расчетов производится оформление таблицы - устанавливаются границы в ячейках, объединяются ячейки там, где размещаются надписи.

Полученную таблицу можно сохранить, при следующих однотипных расчетах с другими параметрами трансформатора можно сделать копию таблицы, ввести в нужные ячейки параметры нового трансформатора и параметры системы после этого автоматически будет выполнен расчет с новыми данными.

Полученную таблицу можно через буфер перенести в текстовый редактор Word или Adobe Acrobat.