

Коррекция сигналов резервных защит при наличии переходного сопротивления электрической дуги

В.И. НАГАЙ, И.В. НАГАЙ, А.В. УКРАИНЦЕВ, П.С. КИРЕЕВ, С.В. САПРЫ

Южно-Российский государственный технический университет

(Новочеркасский политехнический институт)

Россия

nagayiv@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Основные и резервные релейные защиты, электрические распределительные сети, переходное сопротивление, электрическая дуга, алгоритмы функционирования.

1 ВВЕДЕНИЕ

Распознавание повреждений в электрических сетях с ответвительными подстанциями является сложной задачей, особенно при наличии влияния переходного сопротивления на токи аварийных режимов, сопоставимых с токами нагрузочных режимов. При этом наличие переходного сопротивления в месте повреждения приводит к снижению тока и увеличению сопротивления короткозамкнутой цепи, т.е. смещению области аварийного режима в сторону области нагрузочного режима. Не исключено пересечение этих областей, особенно при наличии мощной двигательной нагрузки на смежных подстанциях по отношению к защищаемой подстанции. Для успешного решения задачи распознавания междуфазных повреждений при наличии переходного сопротивления электрической дуги необходимо уточнить информационные признаки, характеризующие рассматриваемые режимы. Информационные признаки рассматриваются для защит ближнего (ЗБР) и дальнего (ЗДР) резервирования электрической распределительной сети с ответвительными подстанциями.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для минимизации влияния переходного сопротивления на функционирование ЗБР и ЗДР уточнены диапазоны параметров информационных признаков данного вида повреждения. Переходное сопротивление электрической дуги носит активный характер и его наличие приводит к снижению модулей и аргументов токов [1-10]. При изменении напряжения на электрической дуге $U_{\pi} = U_{\text{д}} = (0 \div 0,3)U_{\text{ном}}$ модули тока КЗ снижаются до уровня 80% тока металлического КЗ, значение аргумента снижается до значения $0,6\varphi_{\text{КЗМ}}$ (т.е. $55^{\circ} \div 60^{\circ}$), а переходное сопротивление достигает значений $0,6Z_{\text{T}}$, где $\varphi_{\text{КЗМ}}$ – аргумент тока металлического КЗ; Z_{T} – сопротивление трансформатора ответвительной подстанции.

Переходное сопротивление при междуфазных КЗ обусловлено горением электрической дуги, представляющей нелинейное сопротивление, что обуславливает появление высших гармонических составляющих в напряжениях и токах. На процесс горения дуги влияет множество факторов [3,7], в частности, движение воздушных потоков, электродинамические воздействия, обусловленные протеканием токов по собственным и смежным токоведущим частям, изменение электропроводимости среды, изменением температуры и т.д. При горении электрической дуги происходит как удлинение столба дуги, так и его укорачивание за счет

шунтирования отдельных участков с последующим его раздуванием воздушными потоками. На рис.1 приведены вольт-амперная характеристика электрической дуги в фазе A , горящей в замкнутом пространстве ячейки КРУ 6 кВ при трехфазном коротком замыкании. Данные натурные испытания проведены авторами на трансформаторном пункте, питающемся от подстанции 110/6 кВ с трансформатором мощностью 16 МВА.

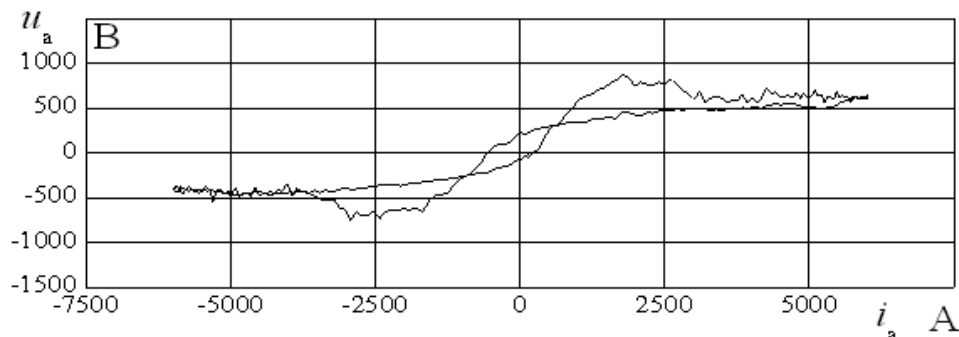


Рис.1. Вольт-амперные характеристики электрической дуги фазы A при трехфазном КЗ при проведении натурных испытаний в ячейке КРУ 6 кВ

При этом максимальное напряжение на столбе электрической дуги не превышало 1000 В, а минимальное напряжение в области токов более 1000 А составляло не менее 200 В. Нестационарность горения электрической дуги отмечена в области значений токов, превышающих 1 кА, при чем как в течение одного периода промышленной частоты, так и периода к периоду. Падение напряжения на столбах дуги различных фаз неодинаково, что вызывает появление несимметрии. Отмечен гистерезисный характер ВАХ электрической дуги «фазное напряжение – фазный ток» $u_\phi(i_\phi)$ (рис.1), что, в частности, обусловлено смещением нейтрали. Изменение длины дуги приводит к изменению падения напряжения на ней $U_d = E_d l_d$, где E_d – напряженность электрического поля столба дуги; l_d – длина столба дуги. Вследствие этого изменяется сопротивление короткозамкнутой цепи, модуль и аргумент тока, что обсуждалось выше, т.е. из-за нестационарности процессов горения высоковольтной электрической дуги происходит изменение параметров сигналов и является признаком дугового КЗ.

Горение электрической дуги может сопровождаться расплавлением, прогоранием токоведущих частей и изолирующих материалов отсеков в электроустановках открытого и корпусного типа, что приводит к перемещению столба дуги под воздействием воздушных потоков и электродинамических сил по токоведущим частям высоковольтной электроустановки и изменению вида повреждения. Например, однофазное замыкание на землю может перерасти в двойное замыкание на землю, а на следующем этапе из-за малых расстояний между токоведущими частями на стороне низшего напряжения 6-10 кВ защищаемых трансформаторов – в трехфазное КЗ. Таким образом, развивающийся характер повреждения является признаком дугового КЗ через переходное сопротивление.

Как правило, междуфазные КЗ на стороне низшего напряжения в ячейках КРУ возникают из однофазных замыканий с последующим переходом в двухфазные и затем в трехфазные КЗ. Также возможно появление двухфазного КЗ с развитием в трехфазное КЗ. Двухфазное КЗ сопровождается появлением симметричных составляющих обратной последовательности, что позволяет достаточно эффективно обеспечить распознавание КЗ за защищаемым трансформатором, особенно при соединении обмоток «звезда – треугольник» [10]. При переходе в трехфазное КЗ несимметрия не исчезает, что обусловлено неравенством длин электрических дуг (рис.2), а также возможным их горением между крайними фазами и средней фазой [9]. При этом ток обратной последовательности снижается и составляет (10÷15)% от тока трехфазного КЗ за трансформатором [9].

При построении защиты ближнего резервирования возможен контроль параметров сигналов (токов, напряжений) на стороне низшего напряжения, что расширяет информационную базу данной защиты. При проведении натурных испытаний на подстанциях

110/10/6 кВ отмечено, что при возникновении междуфазного КЗ через электрическую дугу в электроустановках корпусной конструкции 6-10 кВ появлялось напряжение нулевой последовательности $3U_0 \leq 500$ В из-за касания столба электрической дуги заземленного металлического корпуса ячейки КРУ с последующим уменьшением его амплитуды при переходе в трехфазное КЗ (рис.2).

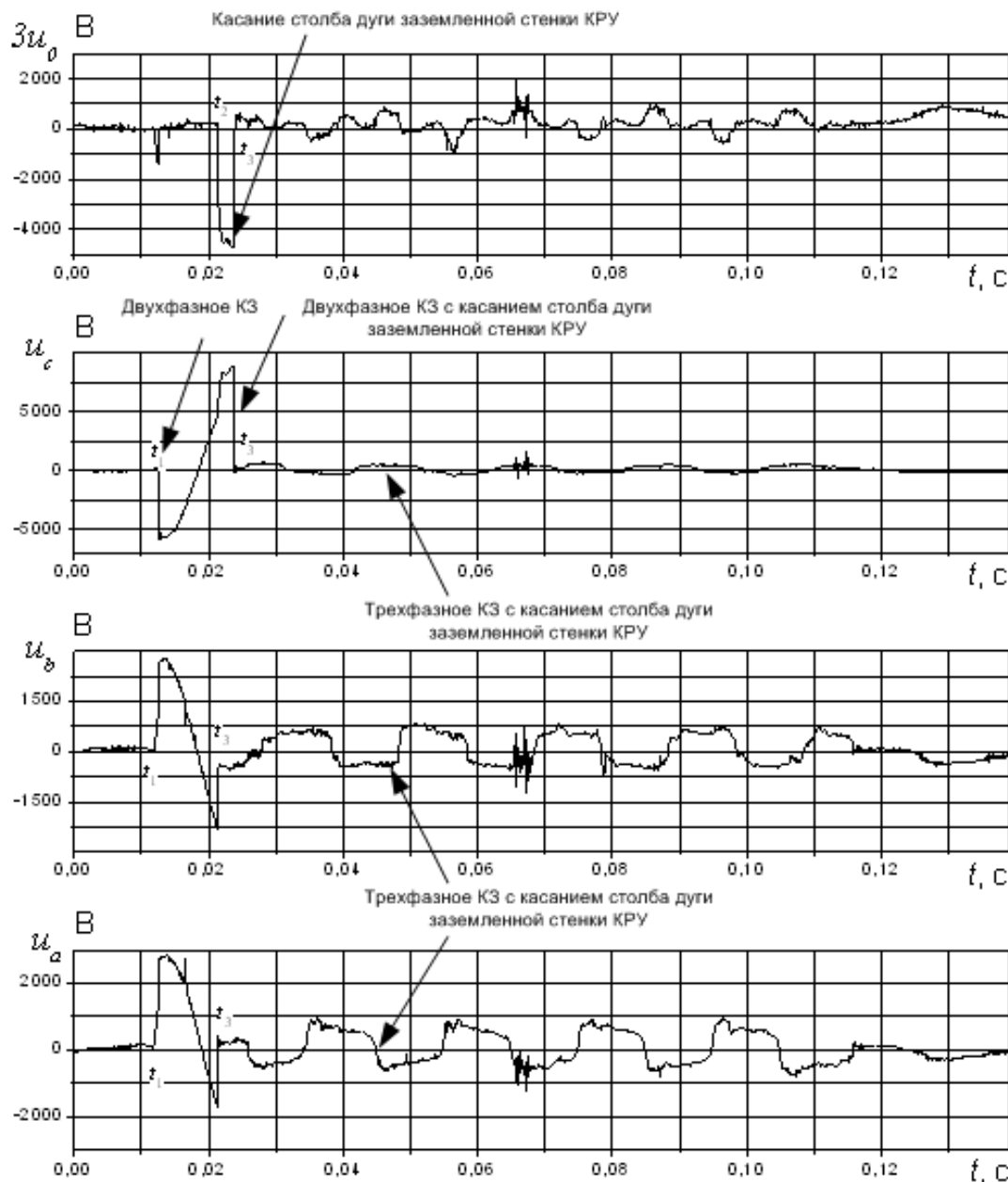


Рис.2. Развивающееся повреждение в электроустановке корпусной конструкции 6 кВ

Также информативным признаком дугового КЗ для ЗБР может являться контроль светового потока, особенно в электроустановках корпусной конструкции. Данный информационный признак широко используется при построении защит с абсолютной селективностью – дуговых защит. Совместный контроль модулей и аргументов токов, их аварийных составляющих, сопротивлений (аварийной составляющей) с использованием специальных алгоритмов позволяют обеспечить минимизацию влияния переходного сопротивления. Достаточно эффективным способом выявления наличия электрической дуги и, как следствие, ее переходного сопротивления является наличие токов обратной последовательности с изменением их уровня.

Нелинейность вольт-амперной характеристики дуги (рис.1 и рис.2), вызывающая появление высших гармонических составляющих в напряжении, позволяет использовать в ЗБР способ контроля высших гармонических составляющих напряжения. В качестве дополнительного способа распознавания наличия переходного сопротивления электрической дуги возможен контроль изменения видов повреждения (однофазное замыкание на землю, двухфазное КЗ, трехфазное КЗ), а также наличия нестационарности процессов горения столба дуги. Для защиты ближнего резервирования также может быть предложен способ контроля светового потока совместно с током, особенно в электроустановках корпусной конструкции.

Наличие переходного сопротивления в месте повреждения обычно приводит к снижению модуля аварийной составляющей тока короткого замыкания и соответственно его аргумента [9-13], а также шунтированию части нагрузки за трансформатором с повреждением. Однако при движении вектора $\Delta \dot{I}$ ($\dot{I}_{\text{КЗ max}}$ – ток металлического КЗ и $\dot{I}_{\text{КЗ min пер}}$ – минимальное значение тока КЗ при наличии переходного сопротивления) в сторону вектора тока нагрузки $\dot{I}_{\text{нг}\Sigma} = \dot{I}_{\text{нг1}} + \dot{I}_{\text{нг2}}$ происходит увеличение суммарного тока $\dot{I}_{\text{КЗ}\Sigma}$.

Аргумент тока КЗ может существенно уменьшаться $\arg(Ikd) = -(60^\circ \div 90^\circ)$ при изменении значения переходного сопротивления $R_{\text{п}} = R_{d*} = (0 \div 0,6)Z_{\text{T}}$ [10]. Модуль тока при КЗ за трансформатором, в отличие от его аргумента (изменение до 33%), изменяется значительно меньше – на (15÷20)% от тока металлического КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора.

Таким образом, влияние переходного сопротивления в месте КЗ при повреждении на стороне низшего напряжения трансформатора наиболее существенно для органов направления мощности, дистанционных органов, а также органов ортогональных составляющих тока и органов приращения сопротивления, приращения ортогональных составляющих тока с торможением и без торможения [10].

Ток в месте установки защиты определяется как сумма векторов тока КЗ и тока нагрузки $I_{\Sigma} = \dot{I}_{\text{КЗ д}} + \dot{I}_{\text{нг}}$ и его модуль с учетом нагрузочной составляющей равен

$$I_{\Sigma} = \sqrt{|\dot{I}_{\text{КЗ д}}|^2 + |\dot{I}_{\text{нг}}|^2 - 2|\dot{I}_{\text{КЗ д}}||\dot{I}_{\text{нг}}|\cos(\Theta)},$$
 где Θ – дополнительный угол между векторами тока КЗ и нагрузочного тока; $\dot{I}_{\text{КЗ д}} = \dot{I}_{\text{КЗ п}}$ – ток КЗ с учетом переходного сопротивления электрической дуги; $\dot{I}_{\text{нг}} = \dot{I}_{\text{нг1}}$ – нагрузочная составляющая тока с учетом шунтирования нагрузки за трансформатором с повреждением. Переходное сопротивление в месте КЗ приводит к уменьшению модуля тока КЗ, но при этом уменьшается аргумент тока КЗ, что увеличивает ток в месте установки защиты. Такое влияние переходного сопротивления в месте КЗ выражается появлением максимума при определенном нагрузочном токе (рис. 3).

На приведенном графике построена зависимость модуля тока в месте установки защиты при КЗ за трансформатором 2,5 МВА, токе нагрузки $I_{\text{нг}} = 0,02I_{\text{КЗ м}} \cdot e^{-j25^\circ}$ и изменении переходного сопротивления $R_{d*} = (0 \div 0,25)Z_{\text{T}}$, где Z_{T} – сопротивление защищаемого трансформатора; $I_{\text{КЗ м}}$ – ток металлического КЗ.

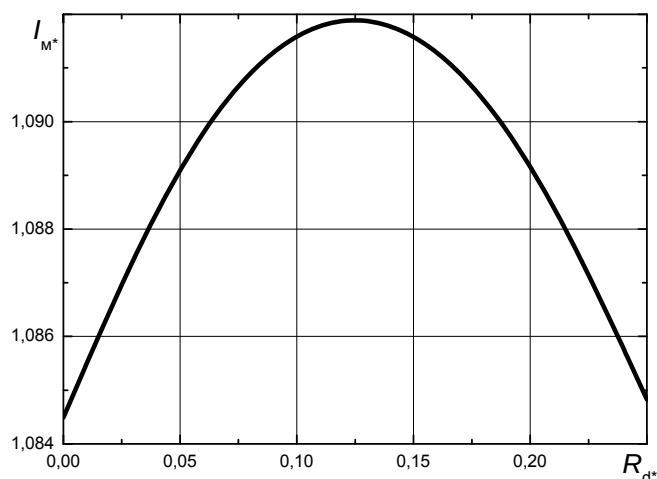


Рис. 3. Влияние переходного сопротивления на изменение тока в месте установки защиты

Максимальное значение тока в месте установки защиты достигается при $\arg(\dot{I}_{нг}) \rightarrow \varphi_{\max}$. При известном аргументе тока нагрузки и изменяющемся модуле тока нагрузки можно определить значение переходного сопротивления, при котором обеспечивается локальный максимум (рис. 4). Здесь приведены зависимости для аргументов тока нагрузки $\varphi_{нг} = -(50^\circ \div 0^\circ)$; сплошной линией для соотношения $|Z_T/Z_{кз\Sigma}| = 0,97$, штриховой линией для $|Z_T/Z_{кз\Sigma}| = 0,77$, где $Z_{кз\Sigma}$ – сопротивление короткозамкнутой цепи.

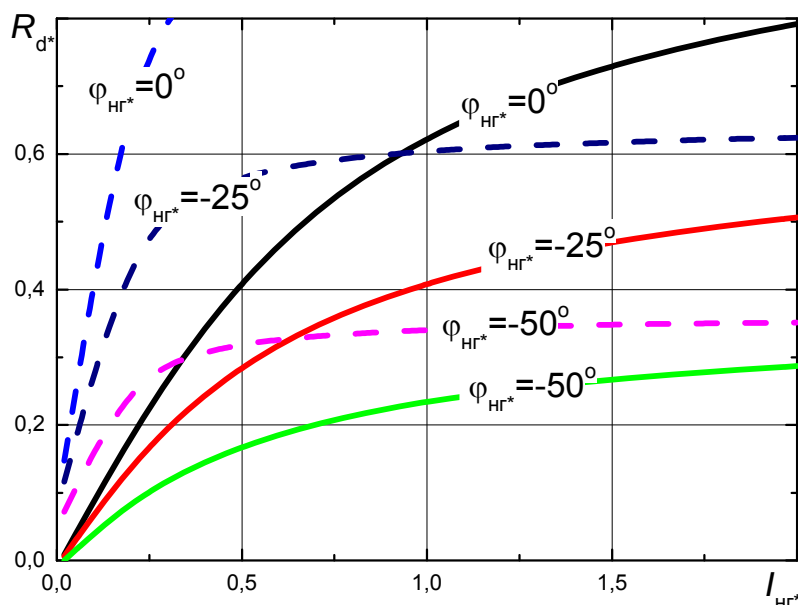


Рис. 4. Условие достижения локального максимума тока в месте установки защиты от переходного сопротивления и тока нагрузки

Величина модуля тока в месте установки защиты увеличивается при увеличении переходного сопротивления в месте КЗ, что приводит к повышению чувствительности токовых защит, контролирующих полные величины. При этом величина реактивной составляющей тока уменьшается, а величина активной составляющей тока увеличивается.

Это приводит к снижению чувствительности измерительных органов, реализующих алгоритмы контроля ортогональных составляющих с торможением от активной составляющей: $\Delta I_{XR_T} = \text{Im}(\dot{I}_{кз} - \dot{I}_{нг}) - k_{TM}(\Delta \dot{I}_B) \text{Re}(\dot{I}_{кз} - \dot{I}_{нг})$, $I_{XR_T} = \text{Im}(\dot{I}_{кз}) - k_{TM}(\dot{I}_{кз}, \dot{I}_{нг}) \text{Re}(\dot{I}_{кз})$.

Выше рассмотрен «помогающий» эффект переходного сопротивления на формирование полного тока КЗ при наличии нагрузочной составляющей, обусловленный перемещением

вектора $\dot{I}_{КЗП}$ в сторону вектора тока $\dot{I}_{НГ}$ и увеличением $\dot{I}_{КЗ\Sigma}$, несмотря на снижение аварийной составляющей $\dot{I}_{КЗП}$. Однако ее уменьшение для измерительных органов, контролирующих приращение токов (аварийные составляющие), приводит к снижению чувствительности резервной защиты в целом. С учетом этого ниже рассмотрена возможность коррекции входного сигнала измерительного органа тока аварийной составляющей, реализующего алгоритм (рис.5):

$$\Delta \dot{I} = \dot{I}_{\Sigma} - \dot{I}_{НГ\Sigma} = \dot{I}_{\Sigma} - (\dot{I}_{НГТ1} + \dot{I}_{НГТ2}),$$

где $\dot{I}_{\Sigma} = \dot{I}_{КЗ} + \dot{I}_{НГТ2}$, $\dot{I}_{НГТ2}$ – ток нагрузки смежного трансформатора Т2; $\dot{I}_{НГ\Sigma}$ – суммарный ток нагрузки в предшествующем аварийному режиму; $\varphi_{НГ} = \arg(\dot{U} \wedge \dot{I}_{НГТ2})$; $\varphi_{КЗ} = \arg(\dot{U} \wedge \dot{I}_{КЗ})$; $\varphi_{\Sigma} = \arg(\dot{U} \wedge \dot{I}_{\Sigma})$; $\Delta\varphi = \arg(\dot{U} \wedge \Delta \dot{I})$; $\alpha = \arg[\dot{I}_{КЗ} \wedge (-\dot{I}_{НГТ1})]$; $\beta = \arg[\dot{I}_{\Sigma} \wedge \dot{I}_{НГТ2}]$.

При этом аварийная составляющая тока $\Delta \dot{I}$ меньше по модулю реального тока в ветви с повреждением $\dot{I}_{КЗ}$ с учетом переходного сопротивления, что приводит к еще большему снижению контролируемой величины и соответственно чувствительности защиты. Это обусловлено вычитанием полного тока нагрузки $\dot{I}_{НГ\Sigma}$, в то время как ее составляющая $\dot{I}_{НГТ1}$ не должна учитываться из-за шунтирования сопротивлением нагрузки трансформатора Т1 (поврежденного присоединения) переходным сопротивлением. Учет составляющей тока $\dot{I}_{НГТ1}$ затруднен из-за неизвестного распределения токов нагрузки по ответвительным подстанциям.

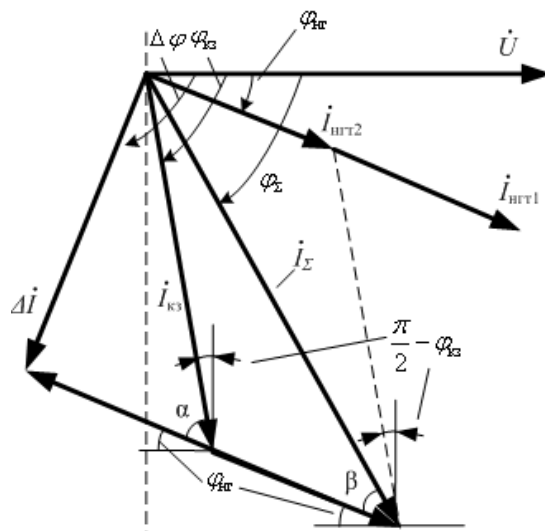


Рис.5. К определению влияния переходного сопротивления на контролируемые токи и их аварийные составляющие

Аварийную составляющую $\Delta \dot{I}$ с учетом последнего соотношения можно определить

$$\Delta I = \sqrt{(I_{КЗТ1})^2 + (I_{НГТ1})^2 - 2I_{КЗТ1}I_{НГТ1} \cos(\varphi_{КЗ} - \varphi_{НГ})}$$

или $\Delta I = I_{КЗТ1} \sqrt{1 + (U_{К*})^2 - 2U_{К*} \cos(\varphi_{КЗ} - \varphi_{НГ})}$.

Тогда при $R_{п} = 0$, $U_{К*} = 0,1$, $\varphi_{НГ} = -30^\circ$, $\varphi_{КЗ} = -85^\circ$, $\Delta I = 0,946$ и неучете шунтирования нагрузки поврежденного трансформатора погрешность в определении аварийной составляющей при металлическом КЗ не превышает 5,4%, что не требует дополнительной коррекции входного сигнала.

Минимальное значение ΔI при $U_{д*} = 0,3$ (что соответствует $R_{п} = 0,6Z_{Т1}$), $\varphi_{КЗП} = -60^\circ$, $\varphi_{НГ} = -30^\circ$ составляет $\Delta I = 0,715I_{КЗТ1}$, в то время как $I_{КЗТП} = 0,8I_{КЗТ1}$ при наличии переходного сопротивления с указанными параметрами. Таким образом, происходит

снижение сигнала на входе измерительного органа на 10,6% по отношению к току $I_{КЗТ1}$, а к току металлического КЗ погрешность составляет 28,5%. Компенсация данной погрешности может быть достигнута за счет учета эффекта шунтирования нагрузки за поврежденным трансформатором Т1. Для этого предлагается принять распределение нагрузок по трансформаторам ответственных подстанций в соответствии с их номинальной мощностью.

Аварийная составляющая тока КЗ за поврежденным трансформатором определяется с учетом полных величин $\dot{I}_\Sigma$ и $\dot{I}_{НГ\Sigma}$: $\Delta\dot{I} = \dot{I}_\Sigma - \dot{I}_{НГ\Sigma}$.

На основе значения аварийной составляющей определяется мощность трансформатора S_i с соответствующим током КЗ и при известной суммарной мощности трансформаторов $S_{тр\Sigma}$ и рассчитывается новое значение аварийной составляющей тока КЗ:

$$\Delta\dot{I}' = \dot{I}_\Sigma - \dot{I}_{НГ\Sigma} \left(1 - \frac{S_i}{S_{тр\Sigma}}\right),$$

$$\Delta I' = I_{КЗi} \sqrt{1 + \left(\frac{S_i}{S_{тр\Sigma}} U_{К*}\right)^2 - 2 \frac{S_i}{S_{тр\Sigma}} U_{К*} \cos(\varphi_{КЗ} - \varphi_{НГ})} \text{ или}$$

$$\Delta I' = \sqrt{I_\Sigma^2 + \left[\left(1 - \frac{S_i}{S_{тр\Sigma}}\right) I_{НГ\Sigma}\right]^2 - 2 I_\Sigma I_{НГ\Sigma} \left(1 - \frac{S_i}{S_{тр\Sigma}}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{КЗ} - \varphi_{НГ}\right)}.$$

Если $\Delta\varphi = \arg(\Delta\dot{I}')$ близок к $\varphi_{КЗ}$, т.е. $|\varphi_{КЗ} - \Delta\varphi| \approx 2^\circ \div 5^\circ$, то считается, что аварийная составляющая определена с допустимой погрешностью для РЗА в 10%. Если же погрешность в определении аргумента тока превышает указанное значение, то производится следующий шаг коррекции в определении тока $\Delta\dot{I}$. При этом новое значение тока ΔI может быть получено: $\Delta I_{j+1} = \Delta I_j k(\Delta\varphi)$, где $k(\Delta\varphi)$ – коэффициент, учитывающий снижение модуля тока КЗ от его аргумента при наличии переходного сопротивления. Таким образом, можно получить новое значение аварийной составляющей ΔI по величине близкое к значению тока металлических КЗ $\dot{I}_{КЗМ}$ с погрешностью не превышающей 10%, что вполне приемлемо для релейной защиты.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены и уточнены основные информационные признаки дугового короткого замыкания: возрастание активной составляющей токов и их составляющих, наличие высших гармонических составляющих в напряжениях, нестационарность процессов короткого замыкания, появление несимметрии при трехфазных КЗ с величиной тока обратной последовательности, достигающей 15% от тока металлического КЗ, появление напряжения нулевой последовательности на стороне низшего напряжения защищаемого трансформатора, развивающийся характер повреждения: «однофазное замыкание – двухфазное КЗ – трехфазное КЗ», «двухфазное КЗ – трехфазное КЗ», появление светового потока от столба электрической дуги, представляющего излучатель, что позволяет выполнять релейные защиты с более высоким техническим и информационным совершенством.

2. Доказана возможность возрастания суммарного тока при КЗ при наличии тока нагрузки и переходного сопротивления по сравнению аналогичным током металлического КЗ.

3. Предложен способ коррекции аварийной составляющей тока короткого замыкания за счет шунтирования нагрузки защищаемого трансформатора переходным сопротивлением в месте повреждения снижает погрешность ее определения, не превышающей 10%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат. 2007. – 549 с.
- [2] Слодарж М.И. Релейная защита и автоматика подстанций на ответвлениях при наличии мощных синхронных электродвигателей// Электрические станции, 1969. – №9. – С. 74–77.
- [3] Бурсдорф В.В. Открытые электрические дуги большой мощности// Электричество. – 1948. – №10. – С.15-23.
- [4] Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. – М.: Высш. шк., 1967. – 195.
- [5] Долинский Ю.М., Бойко В.П., Середа Н.Н. Мощность дугового КЗ в закрытых распределительных устройствах// Изв. вузов Электромеханика. – 1990. – №2. – С.102-108.
- [6] Жуков В.В., Далла А. Расчет сопротивления открытой электрической дуги// Электричество. – 1990. – №1. – С.29-30.
- [7] Жуков В.В. Расчет токов короткого замыкания с учетом изменения параметров короткозамкнутой цепи// Электрические станции. – 2000. – №6. – С. 36-42.
- [8] Жуков В.В. Изменение параметров воздушных линий при коротких замыканиях// Электрические станции. – 2000. – №5. – С. 44-51.
- [9] Майкопар А.С. Дуговые замыкания на линиях электропередачи. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 200 с.
- [10] Нагай И.В. Учет влияния подпитки на переходное сопротивление в месте повреждения за трансформаторами ответвительных подстанций// Изв. ВУЗов. Электромеханика. –2012. – №2. – С. 110-113.
- [11] Нагай В.И. Релейная защита ответвительных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.
- [12] Нагай В.И., Маруда И.Ф., Нагай В.В. Резервирование релейной защиты и коммутационных аппаратов электрических распределительных сетей./Под ред. В.И. Нагая. – Ростовн/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион», 2009. – 316 с.
- [13] Семенов В.А. Оценка действия дистанционных защит с учетом переходного сопротивления в месте короткого замыкания// Электрические станции. – 1962. – №6. – С. 81–83.
- [14] Семенов В.А. Об учете сопротивления электрической дуги при анализе действия дистанционных защит// Электрические станции. – 1961. – №8. – С. 69–70.
- [15] Шабад М.А. Защита трансформаторов распределительных сетей.– Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 136 с.
- [16] Нагай В.И., Нагай И.В. Проблемы и решения дальнего резервирования трансформаторов ответвительных и промежуточных подстанций// Релейщик.-2009.- №04. – С. 30-35.