

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТ ДАЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ НА ЛИНИЯХ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

В.И. Нагай

Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)

E-mail: nagay@novoch.ru

Researched efficiency of protection of distant standby of overhead lines with branches of distributing networks of power systems. Incorporated factor of efficiency of protection, reflective its sensitivity depending on powers of transformers connected to lines, nature of load. Conducted benchmark analysis of efficiency of using considered protection depending on share of the motor load, connected to reserve transformers, its parameters, arguments of current of short circuit.

Осуществление принципа ближнего и дальнего резервирования (ДР) релейных защит, принятого в электроэнергетике, сопряжено с рядом проблем, обусловленных тем обстоятельством, что аварийные режимы, при которых должно обеспечиваться резервирование, не всегда удается отличить от максимальных нагрузочных режимов с учетом режимов пуска и самозапуска электродвигателей (ЭД). К тому же токи короткого замыкания (КЗ) за трансформаторами ответвительных подстанций распределительных сетей напряжением 6-110 кВ зачастую сопоставимы по модулю с вышеуказанными токами, а на чувствительность многих типов защит оказывает существенное влияние переходное сопротивление в месте КЗ.

Об актуальности данной проблемы дальнего резервирования свидетельствует не только письмо Департамента науки и техники РАО «ЕЭС России» ИП 1-96(э) от 30.09.96 г. «О совершенствовании ближнего и дальнего резервирования работы устройств РЗА распределительных сетей 6-110 кВ», но и многочисленные публикации в научно-технической печати, например [1-6].

Применение максимально-токовых (МТЗ) и дистанционных защит (ДЗ) на рассматриваемых линиях не всегда обеспечивает решение рассматриваемой проблемы, и особенно там, где отсутствуют ДЗ с многоугольными характеристиками (МХ). Поэтому во многих случаях на воздушных линиях (ВЛ), не оснащенных ДЗ с МХ, имеет смысл устанавливать дополнительные резервные защиты к уже существующим МТЗ или ДЗ, и выполненных по более простым схемным решениям, чем дистанционные защиты с МХ.

В ЮРГТУ(НПИ) в течение ряда лет проводятся работы по повышению эффективности дальнего резервирования трансформаторов на ВЛ с ответвлениями (в частности, при поддержке гранта №36 Гр-98 Минобразования РФ) и поэтому в данной работе рассматриваются подходы к оценке чувствительности защит, получивших широкое распространение, а также защит, использующих новые алгоритмы функционирования. Для выбора варианта выполнения защит дальнего резервирования ВЛ с ответвлениями произведем оценку эффективности их действия с учетом суммарной мощности трансформаторов, минимальной мощности трансформатора, характера нагрузки. При этом приняты допущения (которые в реальных случаях практически всегда выполняются [1]), что для сопротивления КЗ трансформатора $Z_{тр max}$ минимальной мощности $S_{тр min}$, работающего в распределительных сетях напряжением 110 кВ и мощностью в диапазоне 2,5 – 25 МВА,

справедливо соотношение $\left| Z_c + \sum_{m=1}^m Z_{lm} + Z_{m-1,m} \right| \leq 0,1 |Z_{тр max}|$, где сопротивления системы Z_c и участков

ВЛ Z_{lm} длиной l_m и ее ответвлений $Z_{lm-1,m}$ длиной $l_{m-1,m}$; $m = 1 \div n$, n - количество трансформаторов, подключенных к ВЛ. Тогда сопротивления системы и ВЛ при выполнении сравнительного анализа чувствительности защит можно не учитывать, т.к. погрешность расчета токов КЗ в этом случае не превышает 5-10%, что приемлемо для релейной защиты. Также принято, что аргументы токов нагрузки всех ответвительных подстанций одинаковы и находятся в диапазоне $10^0 - 30^0$, аргументы токов пуска и короткого замыкания соответственно равны $\varphi_n = 50^0 - 70^0$, $\varphi_{кз} = 70^0 - 85^0$ [1-3, 6].

Ниже рассмотрены защиты, реализованные на основе контроля фазных токов, их составляющих, аргументов фазных токов и сопротивлений. К ним относятся: реле фазного тока (РТФ), реле реактивного тока (РТР); реле приращения реактивного тока (РТРП), реле приращения фазного тока (РТФП), реле направления мощности с «узкой» угловой характеристикой (РНМ); реле реактивного тока с торможением (РТРТ) [7], реле приращения реактивного тока с торможением (РТРТП), реле сопротивления с круговыми (РСК), эллиптическими (РСЭ), многоугольными (четыреугольными РСЧ) и треугольными (РСТ) характеристиками. Реле тока прямой (РТПП) и обратной (РТОП) последовательностей, реле разности модулей фазных токов (РТРМ).

Параметры срабатывания защит дальнего резервирования выбираются по условиям отстройки от максимальных нагрузочных режимов с учетом пуска (самозапуска) ЭД

$F_{сз} = f(S_{сум}, \varphi_{нг \min}, \varphi_{нг \max}, \varphi_{п}, k_{д}, k_{п}, k_{отс}, k_{в})$, где $S_{сум}$ - суммарная мощность нагрузок подключаемых к защищаемой линии (в данном случае принимается равной суммарной мощности трансформаторов ответственных подстанций); $\varphi_{нг \min}, \varphi_{нг \max}, \varphi_{п}$ - минимальный и максимальный аргументы тока нагрузки и тока пуска (самозапуска) ЭД; $k_{д}, k_{п}$ - доля двигательной нагрузки, участвующей в пуске (самозапуске) и коэффициент пуска (самозапуска); $k_{отс}, k_{в}$ - коэффициенты отстройки и возврата устройств защиты. Чувствительность защиты принято оценивать коэффициентом $k_{ч}$, определяемым как отношение контролируемого параметра в конце защищаемой зоны в наихудших условиях $G_{\min} = g(S_{тр \min}, \varphi_{нг \min}, \varphi_{нг \max}, \varphi_{кз}, U_{*к})$ к параметру срабатывания $F_{сз}$, где $\varphi_{кз}, U_{*к}$ - аргумент тока при КЗ на стороне низшего или среднего напряжения и максимальное значение напряжения короткого замыкания трансформатора в относительных единицах. Учитывая, что $k_{ч} \geq 1,2$ для всех рассматриваемых защит, то целесообразно произвести сравнительную оценку их эффективности по параметру $S_{сум} / S_{тр \min}$, показывающему при каком отношении суммарной мощности трансформаторов ответственных подстанций $S_{сум}$ к мощности трансформатора минимальной мощности $S_{тр \min}$ рассматриваемая защита обладает достаточной чувствительностью к КЗ за последним. Другие параметры, учитываемые при выборе параметров срабатывания $F_{сз}$ и минимального значения контролируемого сигнала G_{\min} , будут ограничивающими условиями применения защит разного типа в конкретной распределительной сети.

Как показывают исследования [1,2,4] наиболее сложными в распознавании для защит дальнего резервирования являются симметричные режимы, в частности, режимы пуска и самозапуска ЭД. При реализации защит, реагирующих на несимметричные КЗ, условия отстройки от максимальных симметричных нагрузок не являются определяющими и поэтому чувствительность данных защит, как правило, выше чем защиты от симметричных КЗ [4] и в данной работе не рассматриваются. Отстройка от бросков намагничивающего тока трансформаторов (БНТ) при их включении на холостой ход также может не рассматриваться в качестве определяющего условия из-за применения измерительных органов распознавания БНТ [8] или их уставки должны быть выбраны согласно рекомендациям, приведенным в [4].

Режимы пуска и самозапуска ЭД будут успешными, если для напряжения ЭД $U_{д}$ при его пуске будет справедливо соотношение $U_{д} \geq kU_{н}$, где $k = 0,55 - 0,7$ [3]; $U_{н}$ - номинальное значение напряжения. При принятых ранее допущениях максимальный пусковой ток $I_{*п}$, отнесенный к номинальному току силового трансформатора $I_{тр i}$ за которым происходит пуск (самозапуск) ЭД можно определить выражением:

$$I_{*п} = I_{п} / I_{тр i} = \left[-k \cos(\varphi_{п} - \varphi_{тр}) + \sqrt{k^2 \cos^2(\varphi_{п} - \varphi_{тр}) - k^2 + 1} \right] / U_{*к}, \quad (1)$$

где $\varphi_{тр}$ - аргумент сопротивления трансформатора $Z_{тр i}$.

В связи с тем, что защита дальнего резервирования устанавливается со стороны питающей подстанции, то доля пускового тока ЭД в токе пропорциональном суммарной мощности трансформаторов $S_{сум}$ уменьшается и может в общем виде в относительных единицах определена как

$$I_{*ВЛп} = \left[\sum_{i=1}^{n-1} I_{нг i} + I_{п p} + I_{нг p} (1 - k_{д}) \right] / \sum_{i=1}^n I_{нг i}, \text{ а с учетом принятых допущений модуль и аргумент тока со}$$

стороны питающей подстанции будут равны

$$I_{*ВЛп} = \sqrt{(1 - k_{д}^2) + (I_{*п} k_{д})^2 + 2I_{*п} k_{д} (1 - k_{д}) \cos(\varphi_{нг} - \varphi_{п})}, \quad (2)$$

$$\varphi_s = \varphi_{нг} + \arccos \left[\frac{(1 - k_{д})^2 + (I_{*ВЛп})^2 - (I_{*п} k_{д})^2}{2I_{*ВЛп} (1 - k_{д})} \right], \quad (3)$$

где $I_{п p}, I_{нг p}$ - пусковые токи ЭД и токи оставшейся нагрузки p -го трансформатора; $p = 1 \div n$; $I_{нг i}$ - ток нагрузки i -го трансформатора.

Используя полученные соотношения (1-3) можно определить коэффициенты эффективности перечисленных защит:

$$(S_{сум} / S_{тр \min})_{РГФ} = k_{в} / (U_{*к} I_{*ВЛп} k_{отс} k_{ч}), \quad (4)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РТФП}} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cos(\varphi_{\text{НГ}} - \varphi_{\text{КЗ}}) / U_{*к} - \\ - \sqrt{[2 \cos(\varphi_{\text{НГ}} - \varphi_{\text{КЗ}}) / U_{*к}]^2 + 4(I_{* \text{ВЛп}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} k_{\text{тр}} / k_{\text{в}} - 1)^2 / (U_{*к})^2} \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & / 2(I_{* \text{ВЛп}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} k_{\text{тр}} / k_{\text{в}} - 1) \\ (S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РНМ}} &= (tg(\varphi_s + \Delta\varphi) \cos \varphi_{\text{КЗ}} - \sin \varphi_{\text{КЗ}}) / \\ & / (U_{*к} (\sin \varphi_{\text{НГ min}} - tg(\varphi_s + \Delta\varphi) \cos \varphi_{\text{НГ min}})) \end{aligned} \quad (6)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РТР}} = k_{\text{в}} \sin \varphi_{\text{КЗ}} / (U_{*к} I_{* \text{ВЛп}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} \sin \varphi_s), \quad (7)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РТРП}} = k_{\text{в}} \sin \varphi_{\text{КЗ}} / (U_{*к} I_{* \text{п}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} \sin \varphi_s), \quad (8)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РТРТ}} = k_{\text{в}} [\sin \varphi_{\text{КЗ}} - k_{\text{т}}(\varphi, I) \cos \varphi_{\text{КЗ}}] / \{ U_{*к} I_{* \text{ВЛп}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} [\sin \varphi_s - k_{\text{т}}(\varphi, I) \cos \varphi_s] \} \quad (9)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РТРП}} = k_{\text{в}} [\sin \varphi_{\text{КЗ}} - k_{\text{т}}(\varphi, I) \cos \varphi_{\text{КЗ}}] / \{ U_{*к} I_{* \text{п}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} k_{\text{тр max}} [\sin \varphi_{\text{п}} - k_{\text{т}}(\varphi, I) \cos \varphi_{\text{п}}] \} \quad (10)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РСК}} = \cos(\varphi_{\text{МЧ}} - \varphi_{\text{КЗ}}) / (U_{*к} I_{* \text{ВЛп}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} k_{\text{в1}} \cos(\varphi_{\text{МЧ}} - \varphi_s)), \quad (11)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РСЭ}} = \left\{ \cos(\varphi_{\text{МЧ}} - \varphi_s) \right\}^2 + \left[\sin(\varphi_{\text{МЧ}} - \varphi_s) / \varepsilon \right]^2 \left\{ \cos(\varphi_{\text{МЧ}} - \varphi_{\text{КЗ}}) / \right. \\ \left. \left\{ U_{*к} I_{* \text{ВЛп}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} k_{\text{в1}} \cos(\varphi_{\text{МЧ}} - \varphi_s) \left\{ \cos(\varphi_{\text{МЧ}} - \varphi_{\text{КЗ}}) \right\}^2 + \left[\sin(\varphi_{\text{МЧ}} - \varphi_{\text{КЗ}}) / \varepsilon \right]^2 \right\} \right\} \quad (12)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РСЧ}} = (\cos \varphi_s + \sin \varphi_s / tg \gamma) \sin \varphi_{\text{МЧ}} / (U_{*к} I_{* \text{ВЛп}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} k_{\text{в1}} b \sin \varphi_{\text{КЗ}}), \quad (13)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РСТ}} = \sin \varphi_s / (U_{*к} I_{* \text{ВЛ}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}} k_{\text{в1}} \sin \varphi_{\text{МЧ}}), \text{ при } \varphi \geq \beta, \quad (14)$$

$$(S_{\text{сум}}/S_{\text{тр min}})_{\text{РТОП}} = Ak_{\text{в}} / (2U_{*к} I_{* \text{НБ}} k_{\text{отс}} k_{\text{ч}}) \quad (15)$$

где $\Delta\varphi = 5^0 - 10^0$ - угол отстройки от максимальных углов нагрузки с учетом пуска (самозапуска); $\varphi_{\text{МЧ}}$ - угол максимальной чувствительности реле сопротивления и реле направления мощности; ε - отношение малой и большой полуосей эллипса реле сопротивления РСЭ; γ - угол наклона правой стороны четырехугольной характеристики реле сопротивления РСЧ; $b = Z_{\text{сз}}(\varphi = 0)$ для РСЧ; $k_{\text{тр max}} = S_{\text{тр max}} / S_{\text{сум}}$, $S_{\text{тр max}}$ - максимальная мощность трансформатора на ответвлении; φ - аргумент контролируемого тока; β - угол наклона правой стороны РСТ; коэффициент $A = |Z_{\text{эКВ}} / (Z_{\text{с}} + Z_{\text{л1}} + Z_{\text{эКВ}})|$ определяет долю тока обратной последовательности в месте установки защиты от тока в месте КЗ и для $|Z_{\text{с}} + Z_{\text{л1}}| = (0,005 - 0,5)Z_{\text{тр max}}$ равен 0,69-0,99, где $Z_{\text{эКВ}}$ - эквивалентное сопротивление нагрузки, участков ВЛ между ответвлениями (кроме первого) и трансформаторов (кроме поврежденного); $Z_{\text{с}}$, $Z_{\text{л1}}$ - сопротивление системы и первого участка ВЛ до ответвления.

Анализ соотношений (4-14) и зависимостей коэффициентов эффективности (рис.1), построенных на их основе для

$$\varphi_{\text{НГ max}} = 30^0, \varphi_{\text{п}} = 70^0, \varphi_{\text{КЗ}} = 85^0, U_{\text{д}} = (0,55 - 0,7)U_{\text{н}}, k_{\text{д}} = 0,25, k_{\text{т}} = 2,0, k_{\text{отс}} = 1,2,$$

$k_{\text{в}} = 0,8, \varepsilon = 0,5, b = 0,15, \beta = 47^0$ показывает, что наибольшей эффективностью (чувствительностью) к симметричным КЗ за трансформаторами обладают реле реактивного тока с торможением, а также реле сопротивления с эллиптическими и многоугольными характеристиками. Причем реле сопротивления с треугольной характеристикой эффективно в том случае, если $\varphi \leq \beta$ и его чувствительность в этом случае будет ограничена только током точной работы [5]. В противном случае РСТ по эффективности равноценно реле тока типа РТФ и РТФП. По сравнению с последними более эффективны, т.е. обладают большей чувствительностью реле направления мощности, реле реактивного тока. Необходимо отметить, что реле, реагирующие на приращения реактивного тока РТРП и РТРП, должны отстраиваться только от включения нагрузки за наиболее мощным трансформатором. Причем для первого требуется блокировка при действии АПВ, а реле реактивного тока с торможением не требует данной блокировки. Такое условное деление защит по эффективности (чувствительности) справедливо для углов $\varphi \leq \beta$. При больших углах коэффициенты эффективности всех реле падают, но находятся в диапазоне 2-9. При этом эффективность реле реактивного тока с торможением типа РТРП остается более высокой по сравнению с другими реле.

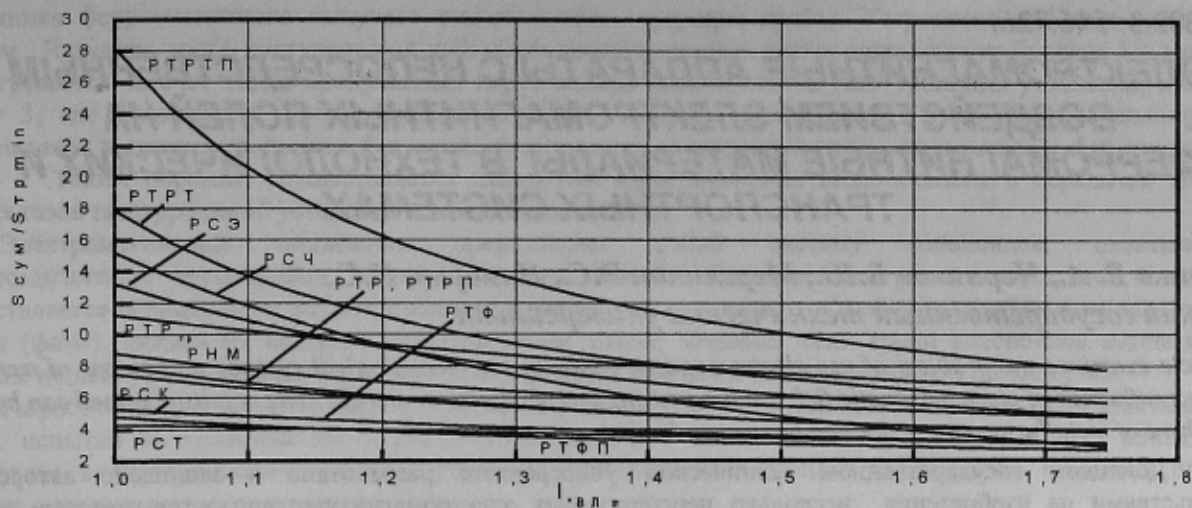


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента эффективности защит от модуля тока ВЛ с учетом пуска ЭД на ответственной подстанции

Необходимо отметить, что наиболее чувствительны к изменению аргументов тока пуска и КЗ реле типа реле направления мощности РНМ, реле реактивного тока с торможением РТРТ, РТРТП и реле сопротивления с четырехугольной характеристикой. Однако снижение эффективности реле реактивного тока с торможением может быть компенсировано адаптивным изменением коэффициента торможения в зависимости от величины аргумента и модуля контролируемого тока. Следует также отметить также, что при этом его эффективность практически не зависит от доли двигательной нагрузки, в то время как другие защиты в большей степени подвержены ее влиянию.

Выводы.

1. На радиальных линиях с ответвлениями с двигательной нагрузкой рекомендуется использовать реле сопротивления с эллиптической или многоугольными характеристиками или реле реактивного тока с торможением. При малой доле двигательной нагрузки возможно применение реле направления мощности с «узкой» угловой характеристикой или реле реактивного тока, как более простых технических решений.

2. Уменьшение влияния на чувствительность защиты дальнего резервирования аргумента тока короткого замыкания (переходного сопротивления в месте КЗ), а также характера нагрузки может быть достигнуто использованием реле реактивного тока с торможением, контролирующего реактивный ток или его приращение, с адаптивным изменением коэффициента торможения в зависимости от аргумента и модуля контролируемого тока

ЛИТЕРАТУРА

1. Клецель М.Я., Никитин К.И. Анализ чувствительности резервных защит распределительных сетей энергосистем// Электричество. 1992. №2. С.19-23.
2. Рубинчик В.А. Резервирование отключений коротких замыканий в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат. 1985, 120 с.
3. Шабад М.А. Защита трансформаторов распределительных сетей. Л.: Энергоатомиздат. 1981, 136 с.
4. Клецель М.Я., Никитин К.И. Резервная защита линий, реагирующая на разность модулей токов фаз и их приращений// Электричество. 1993. №10. С.23-26.
5. Нагай В.И. Анализ эффективности защит дальнего резервирования на воздушных линиях с ответвлениями при одностороннем питании. - Изв. вузов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. -1996.-№3.- С.108-117.
6. Манилов А.М. Дальнее резервирование действия релейной защиты и выключателей в сетях напряжением 35-110 кВ// Промышленная энергетика. 1993. №3. С.24-25.
7. Свидетельство на полезную модель №9099, М. кл. H02H 3/08.-Устройство адаптивной резервной защиты радиальной линии с ответвлениями./ Нагай В.И., Сарры С.В., Чижов К.В., Котлов. М.М.- Оpubл. 16.01.99, Бюл. № 1.
8. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 240 с.
9. Нагай В.И., Подгорный Э.В., Чижов К.В. Учет влияния электрической дуги на чувствительность резервных защит ВЛ с ответвлениями: Тез. докл. XX сессии семинара АН России "Кибернетика электрических систем" по тематике "Диагностика электрооборудования" 22-24 сентября 1998. - Изв. вузов. Электромеханика. - 1999.- № 1.- С.99.