

А. А. Шавёлкин, канд. техн. наук,

О.А. Белобородько

(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЛЕ УТЕЧКИ ДЛЯ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И КОМПЕНСАЦИЕЙ ТОКА ОДНОФАЗНОЙ УТЕЧКИ

В соответствии с существующими требованиями реле утечки предполагает использование источника постоянного оперативного напряжения для контроля сопротивления изоляции и компенсацию емкостной составляющей тока, которая обусловлена ёмкостью сети [1,4]. При этом ёмкость сети может изменяться в достаточно широких пределах.

Таким образом, реле утечки включает в себя источник оперативного напряжения, схему измерения оперативного тока и исполнительное устройство, которое воздействует на вводной выключатель, а также компенсирующее устройство. Наличие в одном устройстве двух цепей постоянного и переменного тока (цепь компенсации), функционирующих одновременно, предполагает наличие разделительного конденсатора, шунтирующего по переменной составляющей тока измерительную цепь оперативного источника.

Возможны два способа автоматической компенсации тока однофазной утечки: пассивная компенсация, посредством реактивного индуктивного элемента – дросселя и активная с использованием регулируемого источника тока.

Пассивная компенсация может быть на базе дросселя с подмагничиванием с автоматической настройкой индуктивности дросселя на емкость сети, и ступенчатой – при переключении катушек дросселя в зависимости от диапазона значений ёмкости сети. Ступенчатое регулирование обеспечивает только частичную компенсацию. Эффективность дросселя с подмагничиванием ограничивается низким быстродействием при подстройке на изменяющиеся параметры сети. Кроме того, система подстройки разомкнута, что снижает эффективность его работы [2].

В работе [3] предложено использовать для активной компенсации тока утечки однофазный автономный инвертор напряжения на транзисторах в режиме источника тока. При этом возможна полная компенсация тока утечки и требуется дроссель с индуктивностью на порядок меньшей, чем при пассивной компенсации (1-3Гн). Однако для компенсации необходимо выявлять повреждённую фазу сети. На интервале времени выявления утечки и повреждённой фазы компенсация отсутствует, что снижает эффективность такого устройства.

Цель работы: Повышение эффективности и быстродействия устройства защиты с активной компенсацией тока однофазной утечки для сетей с изолированной нейтралью при использовании автономного инвертора напряжения в режиме источника тока.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- оценка длительности переходных процессов в цепи источника оперативного напряжения при различных параметрах сети и определение минимального времени для получения достоверной информации об утечке;
- разработка быстродействующего измерительного устройства постоянного оперативного тока.
- исследование структуры системы управления устройством активной компенсации тока утечки с максимальным быстродействием.

Для исследований использовалось моделирование с применением программного пакета EWB, а для расчетов - Mathcad.

Изложение материала и результатов работы.

Существующие решения с пассивной компенсацией емкостной составляющей тока утечки при необходимости применения источника оперативного напряжения предполагают обязательное использование разделительной емкости C_p для обеспечения компенсации емкостной составляющей тока утечки и отделения цепи компенсации от цепи источника оперативного напряжения.

Схема замещения для случая однофазной утечки тока на землю приведена на рис.1, где $R_{ут}$ - сопротивление утечки, $C_{из}$, $R_{из}$ - суммарная емкость и активное сопротивление изоляции, R - сопротивление резистора в цепи оперативного источника, L - индуктивность компенсирующего дросселя. В качестве параметра, определяющего сопротивление изоляции, используется ток оперативного источника E .

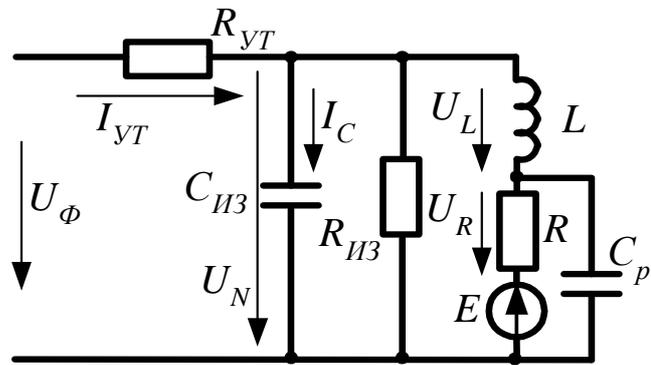


Рис.1. Схема замещения для случая однофазной утечки тока на землю

Присутствие реактивных элементов в цепи (рис.1) обуславливает наличие переходного процесса при возникновении утечки. Для оценки длительности переходного процесса в цепи источника оперативного напряжения воспользуемся операторным методом расчета.

Для данной схемы замещения приравняем входное сопротивление схемы в операторной форме $z(p)$ относительно зажимов источника оперативного напряжения E к нулю, замкнув между собой зажимы переменного источника $U_φ$.

Входное сопротивление в операторной форме:

$$z(p) = \frac{(R \cdot L \cdot C_p \cdot R_{ут} \cdot R_{из} \cdot C_{из}) \cdot p^3 + (L \cdot R_{ут} \cdot R_{из} \cdot C_{из} + L \cdot C_p \cdot R_{ут} \cdot R + R_{ут} \cdot R_{из} \cdot p \cdot C_{из} + R_{ут} + R_{из} + L \cdot C_p \cdot R_{из} \cdot R) \cdot p^2 + (L \cdot R_{ут} + L \cdot R_{из} + R \cdot R_{ут} \cdot R_{из} \cdot C_{из} + p^2 \cdot L \cdot C_p \cdot (R_{ут} \cdot R_{из} \cdot p \cdot C_{из} +$$

$$\frac{+ C_p \cdot R_{YT} \cdot R_{ИЗ} \cdot R) \cdot p + R_{YT} \cdot R_{ИЗ} + R_{YT} \cdot R + R_{ИЗ} \cdot R}{+ R_{YT} + R_{ИЗ}) + p \cdot C_p \cdot R_{YT} \cdot R_{ИЗ}} = 0. \quad (1)$$

Для выражения (1) характеристическое уравнение имеет вид:

$$A \cdot p^3 + B \cdot p^2 + C \cdot p + D = 0,$$

где

$$\begin{aligned} A &= R \cdot L \cdot C_p \cdot R_{YT} \cdot R_{ИЗ} \cdot C_{ИЗ}; \\ B &= L \cdot R_{YT} \cdot R_{ИЗ} \cdot C_{ИЗ} + L \cdot C_p \cdot R_{YT} \cdot R + L \cdot C_p \cdot R_{ИЗ} \cdot R; \\ C &= L \cdot R_{YT} + L \cdot R_{ИЗ} + R \cdot R_{YT} \cdot R_{ИЗ} \cdot C_{ИЗ} + C_p \cdot R_{YT} \cdot R_{ИЗ} \cdot R; \\ D &= R_{YT} \cdot R_{ИЗ} + R \cdot R_{YT} + R_{ИЗ} \cdot R. \end{aligned}$$

Это характеристическое уравнение имеет один действительный и два мнимых сопряжённых комплексных корня [4]. Для определения длительности переходного процесса в цепи источника оперативного напряжения нужно оценить постоянную времени переходного процесса. Она может быть определена как $\tau = -\frac{1}{p'}$ (p' – максимальное действительное значение из трёх корней характеристического уравнения [5]). Время переходного процесса для тока, протекающего в цепи оперативного напряжения $T = (3-5) \cdot \tau$.

Характеристическое уравнение для схемы (рис.1) без разделительного конденсатора C_p при активной компенсации имеет вид:

$$B \cdot p^2 + C \cdot p + D = 0,$$

где:

$$\begin{aligned} B &= L \cdot R_{YT} \cdot R_{ИЗ} \cdot C_{ИЗ}, \\ C &= L \cdot R_{YT} + L \cdot R_{ИЗ} + R \cdot R_{YT} \cdot R_{ИЗ} \cdot C_{ИЗ}, \\ D &= R_{YT} \cdot R_{ИЗ} + R \cdot R_{YT} + R_{ИЗ} \cdot R. \end{aligned}$$

При расчете рассматривались следующие параметры сети: $R_{ИЗ}$ от 20 кОм до 1 МОм, $C_{ИЗ}$ от 0 до 3 мкФ и $R_{YT}=1$ кОм (случай, когда быстродействие должно быть максимальным). Результаты расчета иллюстрирует рис.2, где приведены графики зависимости $\tau(C_{ИЗ})$ при пассивной и активной компенсации. Для пассивной компенсации (с разделительным конденсатором $C_p=10$ мкФ) рассматривались варианты с полной компенсацией (L дросселя определяется из условия настройки на резонанс с $C_{ИЗ}$) и частичной компенсацией (фиксированное значение L).

Из полученных зависимостей рис.2 видно, что время переходного процесса для тока, протекающего в измерительной цепи источника оперативного напряжения, существенно растет при увеличении L .

Вторым фактором, увеличивающим длительность переходного процесса, является емкость разделительного конденсатора (отсутствию разделительного конденсатора соответствует нижняя кривая на рис.2). Таким образом, исключение разделительного конденсатора позволяет снизить примерно в три раза продолжительность переходного процесса и, соответственно, время выявления тока утечки. Это касается постоянной составляющей оперативного тока. Однако есть еще одно обстоятельство, затрудняющее процесс выявления и измерения оперативного тока.

Несмотря на разделение цепей компенсации и источника оперативного тока в измерительной цепи присутствует переменная составляющая с частотой напряжения сети (рис. 3) – часть тока компенсации, определяемая соотношением сопротивлений разделительного конденсатора X_C и оперативного источника R . Такая же картина имеет место и при отсутствии разделительного конденсатора (рис.4).

Очевидно, что выделение постоянной составляющей тока оперативного источника предполагает использование фильтра. Это приводит к дополнительному запаздыванию в схеме измерения.

Для схемы (рис. 1) без разделительного конденсатора возможен практически безинерционный вариант выделения постоянной составляющей оперативного тока. Для этого используется дроссель в цепи оперативного источника (необходим для формирования тока компенсации). Напряжение на нем имеет только переменную составляющую $u_L = L \frac{di_o}{dt}$ (i_o –

ток в цепи оперативного источника). Напряжение на индуктивности и ток в цепи оперативного источника связаны известными соотношениями:

$$u_L = I_m \cdot \omega \cdot L \cdot \cos \omega t,$$

$$i_o = I_m \sin \omega t + i_d,$$

где I_m – амплитуда переменной составляющей тока, i_d – постоянная составляющая то-

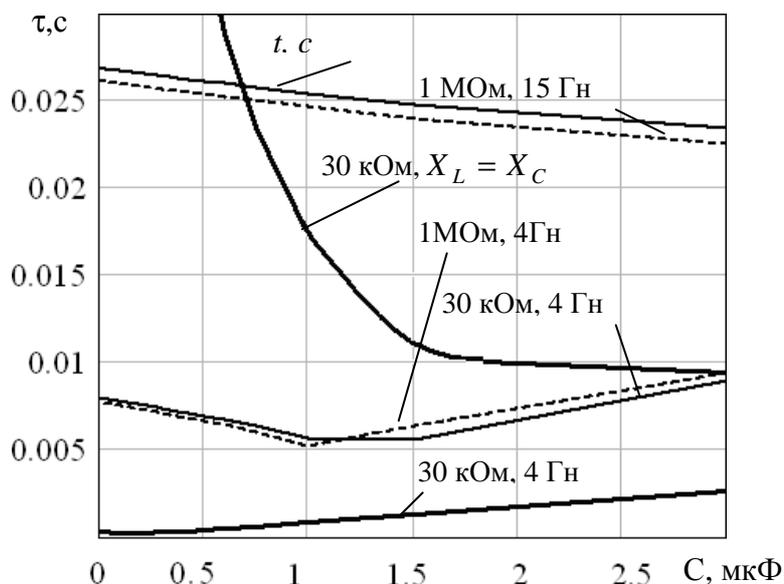


Рис.2. Расчётные зависимости постоянной времени от ёмкости изоляции

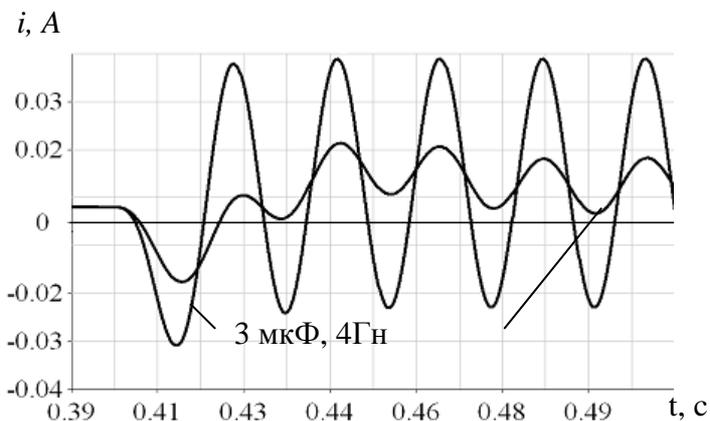


Рис.3. Осциллограмма тока в цепи источника оперативного напряжения при наличии разделительного конденсатора

ка, ω – угловая частота напряжения сети.

Продифференцировав выражение для u_L , получаем $u_L^1 = -I_m \cdot \frac{1}{K} \cdot \sin \omega t$ ($K = \frac{1}{\omega^2 \cdot L}$). Таким образом, сложив i_o и $K \cdot u_L^1$ можно исключить переменную составляющую и, как результат, получаем $i_{o1} = i_d$ (соответствующая кривая приведена на рис.4).

Возможность активной компенсации тока утечки показана в [3]. При этом система регулирования в качестве сигнала обратной связи использует напряжение поврежденной фазы. Для достоверного выявления поврежденной фазы требуется определённое время. Таким образом, задержка времени на осуществление компенсации складывается из времени выявления однофазной утечки и времени определения поврежденной фазы. Время выявления поврежденной фазы также включает продолжительность переходных процессов. Причем это время может увеличиваться из-за наложений коммутаций в сетях.

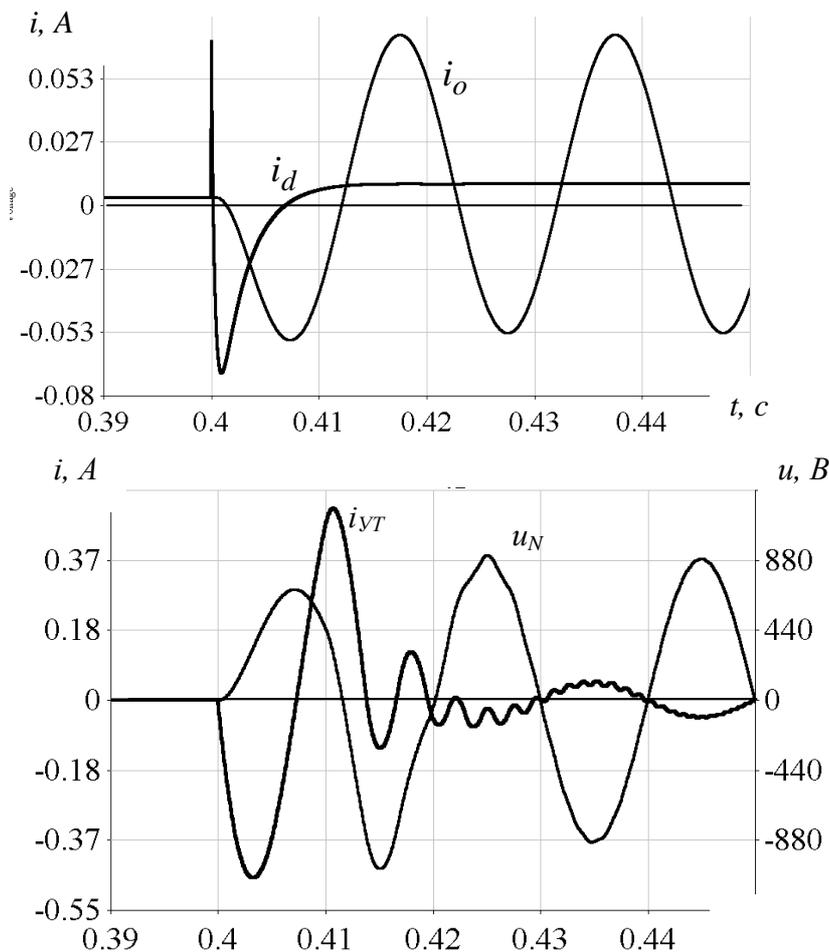


Рис.4. Осциллограммы токов в цепи источника оперативного напряжения, ток утечки при компенсации емкостной составляющей тока однофазной утечки

В то же время известны методы определения ёмкости сети при использовании дополнительного оперативного источника высокой частоты [1,4], чем обеспечивается высокое быстродействие измерения. Это позволяет обеспечить реакцию устройства компенсации в случае, если емкость изменяется в процессе возникновения утечки.

При известной емкости сети мгновенное значение емкостной составляющей тока утечки можно получить в соответствии со схемой (рис.1), используя дифференцирующее устройство с перестраиваемым коэффициентом (определяется емкостью сети) по измеренному значению напряжения смещения нейтрали u_N , т.е.

$$i_C = C_{ИЗ} \cdot \frac{du_N}{dt}.$$

Таким образом, имеется возможность реализации компенсации путем формирования тока инвертора в противофазе с расчётным значением емкостной составляющей тока утечки. При этом сигнал ($-i_C$) используется как задание и подается на вход релейного регулятора [3], на второй вход которого подается выходной ток, чем обеспечивается работа инвертора в режиме источника тока.

Осциллограммы, иллюстрирующие работу устройства в сети с активным сопротивлением и емкостью на фазу $R_{ИЗ}=60$ кОм и $C_{\phi}=1$ мкФ при $R_{УТ}=1$ кОм приведены на рис. 4.

Из полученных осциллограмм (рис.4) видно, что при включении регулируемого источника тока возникает переходный процесс, когда емкостной ток утечки компенсировать полностью невозможно. Продолжительность переходного процесса составляет не более 10 мс – половина периода основной гармоники. Таким образом, схема компенсации имеет достаточно высокое быстродействие. Исследования процессов в схеме показывают, что эффективная компенсация тока однофазной утечки достигается в широком диапазоне изменения емкости сети и сопротивлений утечки, при снижении емкости сети качество и быстродействие обработки тока улучшаются.

Выводы

1. Показано, что исключение разделительного конденсатора в сочетании с предложенным принципом выделения постоянной составляющей позволяет свести до минимума время выявления утечки (до 10 мс).

2. Использование для компенсации регулируемого источника тока, выходной ток которого формируется исходя из мгновенного значения напряжения смещения нейтрали и измеренного значения емкости сети, позволяет уменьшить длительность действия некомпенсированного тока утечки до 20 мс.

3. Дальнейшее повышение эффективности активной компенсации связано с достижением полной компенсации тока утечки, включая активную составляющую, начиная с момента возникновения утечки, возможность чего показывают предварительные исследования.

Список литературы

1. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок. /Є.О. Вареник, С.І. Випанасенко, В.С. Дзюбан, Н.А.Шидловська, Ф.П. Шкрабець. – Д.: Національний гірничий університет, 2004.-334 с.
2. Задорожний В.И. Анализ надежности аппаратов защиты от токов утечки в электрических сетях угольных шахт напряжением до 1000В. Взрывозащищенное электрооборудование //Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ – Донецк, 2006. – С.110-112.
3. Шавелкин А.А., Белобородько О.А. Исследование возможностей компенсации однофазных токов утечки в сетях с изолированной нейтралью // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2006. – Вип. 76. – С. 3–8.
4. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. - М.: Недра, 1982.-152 с.

5. Рибалко М. П., Есауленко В. О., Костенко В.І. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола: Підручник. – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513с.