

А.А. Шавёлкин, канд. техн. наук,

О.А. Белобородько

(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЕНСАЦИИ ОДНОФАЗНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Компенсация емкостных составляющих токов утечки является важнейшим элементом системы электробезопасности. Проблема усугубляется в комбинированных сетях с преобразователями частоты.

В существующих устройствах защиты от утечки на землю для ограничения емкостных токов применяются пассивные статические и автоматические компенсаторы на основе дросселя или дросселя с подмагничиванием [1].

В работе [2] для повышения эффективности компенсации предложено использовать активное компенсирующее устройство – конвертор отрицательного сопротивления (аналог компенсирующего дросселя), комплексное сопротивление которого равно эквивалентному емкостному сопротивлению сети с обратным знаком. Идея интересная, но предполагает знание емкости сети и не эффективна при изменении конфигурации (параметров) сети. Основное достоинство такого решения – возможность эффективной компенсации при изменении частоты напряжения источника, что актуально в сетях с преобразователями частоты (компенсация по основной гармонике). Практическая реализация такого способа компенсации в реальной сети не очевидна, особенно в связи с тем, что представляет собой аналоговое устройство, работающее в режиме усиления. При высоком напряжении сети это, даже при относительно небольших токах компенсации, обуславливает значительные потери мощности в схеме.

Цель работы: исследование возможностей и основных принципов активной компенсации токов однофазной утечки в сетях с изолированной нейтралью при использовании регулируемого источника тока.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- исследование возможностей реализации регулируемого источника тока на базе схемы автономного инвертора напряжения (АИН) с релейным регулятором тока;

- исследование принципов реализации системы автоматической компенсации тока утечки:

- исследование возможностей частичной компенсации (только емкостной составляющей) и полной компенсации тока однофазной утечки в сети постоянной и переменной частоты.

В качестве инструмента исследований использовалось моделирование с использованием программного пакета EWB.

Изложение материала и результатов работы. Как и существующие устройства компенсации, регулируемый источник тока (РИТ) включается между искусственной нейтральной точкой сети и заземлением. Для анализа процессов применим схему замещения для случая однофазной утечки на землю

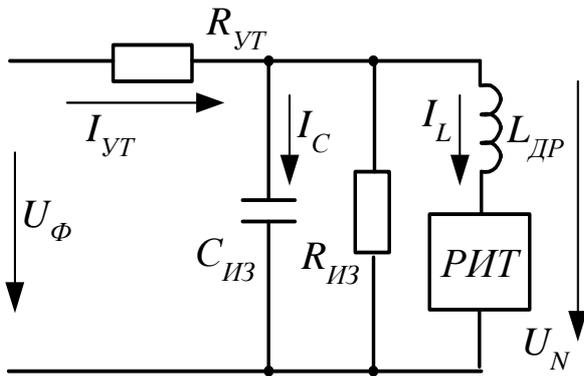


Рис. 1. Схема замещения исследуемой сети

(рис.1). Параметры схемы замещения неизвестны и могут изменяться при подключении (отключении) отходящих линий, а также в процессе эксплуатации. Очевидно, что эффективная работа РИТ по компенсации токов утечки возможна только при замкнутой по току системе автоматического регулирования. Непосредственно измерить фактическое значение тока утечки невозможно. Рассмотрим возможности реализации системы при использовании

доступных для измерения параметров. Анализ выполняем исходя из конечного результата.

Условие компенсации реактивных составляющих тока утечки равенство реактивных проводимостей сети и компенсирующего устройства. При этом I_{UT} определяется напряжением фазы U_ϕ , в которой произошла утечка, активными сопротивлениями утечки R_{UT} и изоляции $R_{ИЗ}$:

$$I_{UT} = \frac{U_\phi}{R_{UT} + R_{ИЗ}}.$$

Ток I_{UT} является чисто активным и по фазе совпадает с U_ϕ . Таким образом, при использовании РИТ задание на ток утечки можно формировать исходя из U_ϕ при заданной амплитуде $I_{UTЗAD}$. Остается открытым вопрос с сигналом обратной связи. В качестве его можно использовать напряжение смещения нейтрали U_N , а точнее ток

$$I^1_{UT} = \frac{U_\phi - U_N}{R_{UTЗAD}}, \quad (1)$$

где: $R_{UTЗAD}$ – заданное значение сопротивления утечки. Фактическое значение $R_{UT\phi}$ может быть любым (в диапазоне срабатывания защиты).

Оценим фактическое значение тока утечки $I_{UT\phi}$ при отработке системой заданного значения $I_{UTЗAD} = I^1_{UT}$. Выразив в выражении для фактического тока утечки

$$I_{UT\phi} = \frac{U_\phi - U_N}{R_{UT\phi}}$$

числитель из (1) получаем

$$I_{UT\phi} = \frac{I_{UTЗAD} R_{UTЗAD}}{R_{UT\phi}} = \frac{I_{UTЗAD}}{K},$$

где: $K = R_{UT\phi} / R_{UTЗAD}$.

Значение $R_{UTЗAD}$ принимаем 1кОм, при этом $K > 1$ и фактическое значение

тока утечки меньше заданного.

Рассмотрим возможность реализации регулируемого источника тока. Он должен обладать достаточно высоким быстродействием и минимальным потреблением энергии. При высоком напряжении сети (660 или 1140 В) аналоговый вариант схемы непрерывного действия не подходит, достичь минимальных потерь в схеме позволяет ключевой режим работы.

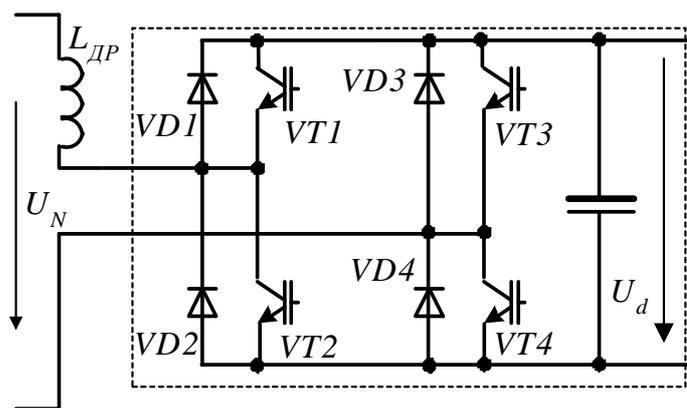


Рис.2 . Схема регулируемого источника тока

Как показал анализ, предъявляемым требованиям в наибольшей степени удовлетворяет схема однофазного автономного инвертора напряжения, работающего в режиме источника тока (рис.2). Этот режим обеспечивается введением в выходную цепь АИН дросселя (может использоваться компенсирующий дроссель [1], хотя требуемое значение индуктивности в несколько раз меньше) и использованием релейного регулятора тока. АИН выполняется на транзисторах с обратными диодами, что обеспечивает двустороннюю передачу энергии. Выходное напряжение АИН может принимать два значения $+U_d$ и $-U_d$ (U_d – напряжение источника в звене постоянного тока АИН).

Релейный регулятор обеспечивает работу АИН по следующему алгоритму: если фактическое значение тока $0 < i_\phi < i_{зАд}$, то напряжение АИН равно $+U_d$ и ток в цепи дросселя нарастает; при достижении порога срабатывания регулятора ($i_{зАд} + \Delta$) регулятор переключает АИН в состояние $-U_d$, что приводит к снижению тока; при достижении током значения ($i_{зАд} - \Delta$) происходит переключение в состояние $+U_d$ и т.д.. Таким образом, ток обрабатывается в заданном "коридоре" значений.

Осциллограммы, иллюстрирующие работу РИТ в режиме компенсации емкостной составляющей тока утечки в сети с активным сопротивлением и емкостью на фазу $R_{ИЗ} = 100 \text{ кОм}$ и $C_{ИЗ} = 1 \text{ мкФ}$ при $R_{УТ} = 1 \text{ кОм}$ приведены на рис.3.

Заданное значение амплитуды $I_{УТЗАд}$ составило 50мА. Из полученных диаграмм видно, что при включении РИТ возникает переходный процесс, когда реактивный ток утечки компенсировать полностью невозможно. Продолжительность переходного процесса составляет не более 10 мс – полпериода основной гармоники. После завершения переходного процесса величина тока утечки поддерживается на заданном уровне и не превышает 50 мА.

Из рис. 3, в видно, что в процессе работы системы регулятор "подтягивает" напряжение смещения нейтрали к фазному напряжению сети. Это подтверждает возможность полной компенсации тока утечки при условии, что $U_\phi = U_N$. Задание на ток при этом $I_{УТЗАд} = 0$. Соответствующие осциллограммы напряжений и токов в цепи приведены на рис. 4.

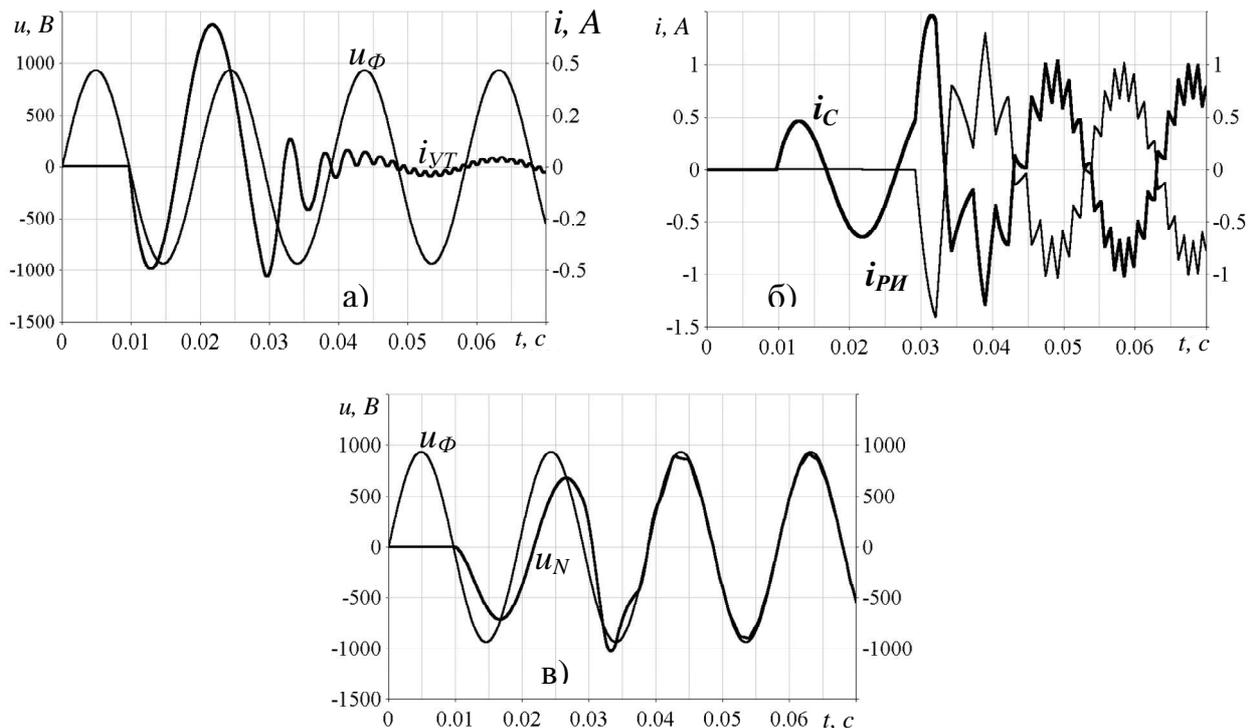


Рис.3. Осциллограммы процессов в схеме при компенсации емкостной составляющей тока утечки

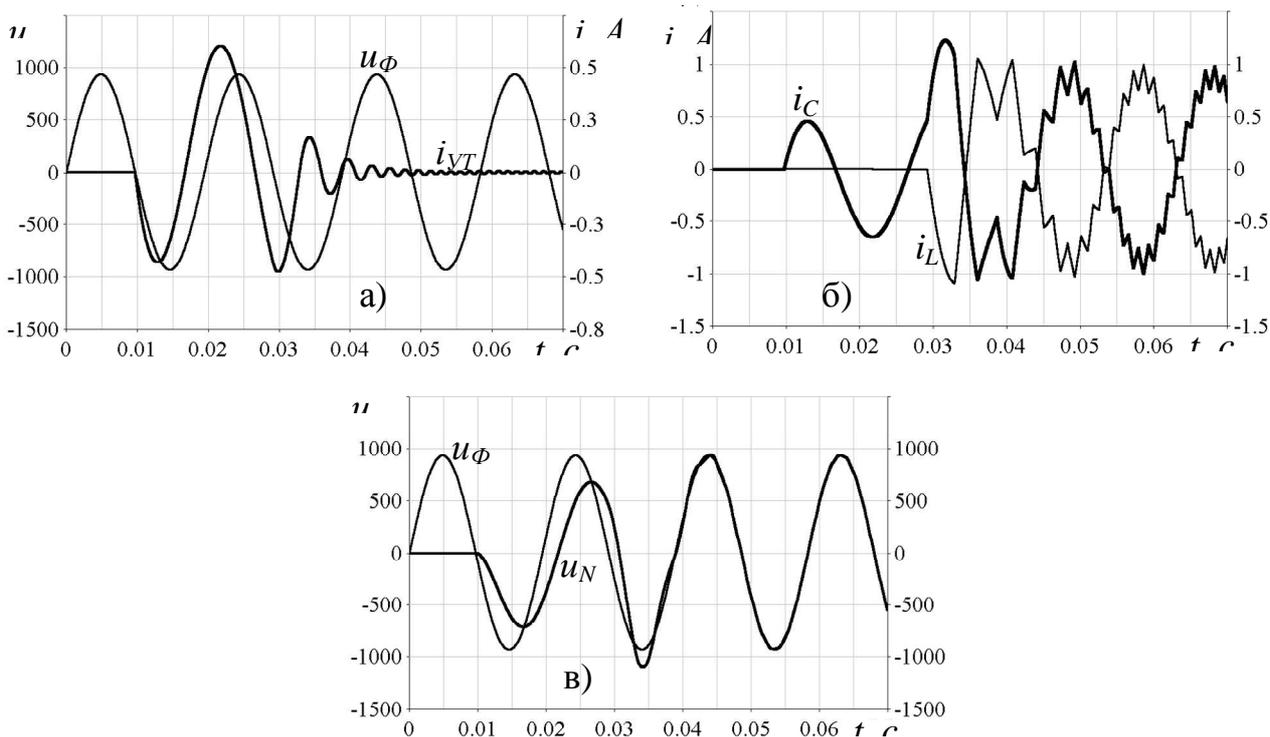


Рис.4. Осциллограммы процессов в схеме при полной компенсации тока однофазной утечки

На рис. 5 приведена векторная диаграмма, соответствующая режиму полной компенсации тока утечки. Из нее видно, что РИТ формирует реактивный (индуктивный) ток, компенсирующий емкостную составляющую тока утечки, а также формирует активную составляющую I_{VTA} в противофазе с соответствующей составляющей, вызываемой напряжением сети.

Как показывают исследования, использование предложенного принципа возможно и в комбинированных сетях с преобразователем частоты. Однако большие значения ёмкости сети ограничивают скорость изменения напряжения смещения нейтрали и, соответственно, тока утечки и, как результат, возможности компенсации высокочастотных составляющих тока утечки. Компенсация эффективно достигается только по основной гармонике, по высшим гармоникам – только частичная. Здесь нужно учитывать следующие соображения.

При "длинных" кабельных линиях (более 30 м) от преобразователей частоты (ПЧ) до асинхронных двигателей имеют место волновые переходные процессы, делающие невозможной эксплуатацию преобразователя частоты без использования выходных фильтров. При наличии выходного $L-C$ фильтра высокочастотные гармоники от ПЧ значительно подавляются. При этом не компенсируемые составляющие тока утечки не выходят за допустимые значения ГОСТа, при использовании предложенного устройства.

Реализация такой схемы вполне реальна для шахтных сетей с напряжениями 660 и 1140 В, поскольку в настоящее время выпускаются транзисторы малой мощности на напряжение 1700 В. Источник питания в звене постоянного тока может быть реализован на базе простейшего повышающего импульсного преобразователя при питании от обмотки трансформатора 127 В.

Выводы:

1. Показана возможность использования схемы однофазного автономного инвертора напряжения с релейным регулятором в режиме регулируемого источника тока при включении его последовательно с индуктивностью между искусственной нейтральной точкой источника переменного напряжения и заземлением.

2. Показана возможность косвенного определения тока однофазной утечки при компенсации емкостной составляющей.

3. Подтверждена возможность полной компенсации тока утечки.

4. Компенсация эффективна только при условии достаточно быстрого определения поврежденной фазы, что предполагает дополнительные исследования в этом направлении.

5. Поскольку предложенное устройство выполняет функцию защиты только при однофазной утечке, то дальнейшим направлением исследований должно быть взаимодействие его с существующими устройствами защиты с использованием источника оперативного напряжения или возложение этих функций на инвертор напряжения.

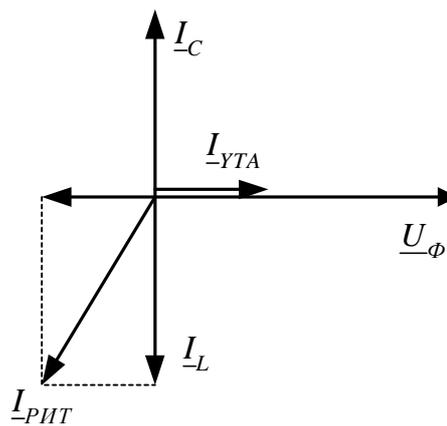


Рис.5. Векторная диаграмма токов

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. Повышение эффективности компенсации емкостной составляющей тока утечки на землю в электросетях с преобразователями частоты /С.В. Дубинин, К.Н. Маренич, В.Н. Ставицкий, М.С. Дубинин // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип.75. – с.39-44.