

УДК 622:621.31

А. А. ШАВЕЛКИН (канд. техн. наук, доц.), О. А. БЕЛОБОРОДЬКО
Донецкий национальный технический университет
sha@dgtu.donetsk.ua

ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ТОКА В УСТРОЙСТВЕ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ТОКА ОДНОФАЗНОЙ УТЕЧКИ

В статье рассмотрены вопросы улучшения характеристик устройства активной компенсации однофазных токов утечки на базе автономного инвертора напряжения в режиме источника тока.

Актуальность. Безопасная эксплуатация сетей с изолированной нейтралью, особенно для горных предприятий предполагает наличие реле утечки и устройства компенсации емкостной составляющей токов утечки. Причём эффективная компенсация в существенной степени снижает требования к быстродействию защитных отключающих аппаратов и повышает уровень защиты от поражения электрическим током. В этом плане улучшение характеристик устройства активной компенсации остается актуальной проблемой.

Состояние вопроса. Возможны два способа автоматической компенсации тока однофазной утечки: пассивная компенсация, посредством реактивного индуктивного элемента – дросселя и активная с использованием регулирующего элемента (транзисторов при наличии независимого источника питания).

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 (особенно при переходе на более высокий класс напряжения, увеличении длины сетей и увеличении емкости кабелей). Кроме того, система подстройки разомкнута, что снижает эффективность работы [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. Практическая реализация такого устройства компенсации в реальной сети не очевидна, в связи с тем, что оно представляет собой аналоговое устройство, работающее в режиме усиления как регулируемое сопротивление. При высоком напряжении сети это, даже при относительно небольших токах компенсации, обуславливает значительные потери мощности в выходных транзисторах.

В [3] предложено использовать активную компенсацию с использованием регулируемого источника тока (РИТ) с независимым источником питания. В качестве регулируемого источника тока используется однофазный автономный инвертор напряжения (АИН) в режиме источника тока с релейным регулятором, работающий в импульсном режиме. Применение практически безинерционного источника, включенного параллельно источнику оперативного тока реле утечки, позволяет исключить из схемы разделительный конденсатор, что существенно повышает быстродействие выявления утечки. Достигается эффективное подавление тока утечки и в переходных режимах при возникновении утечки даже при неблагоприятных начальных условиях. Вместе с тем реализация РИТ предполагает исследование режимов работы релейного регулятора. Ограничены частотные характеристики транзисторов. Устройство компенсации не должно оказывать влияния на работу других устройств (устройства измерения оперативного тока и измерения ёмкости сети). Все это обуславливает необходимость дальнейших исследований принципов реализации РИТ, включая расчет его параметров.

Цель работы. Улучшение характеристик устройства активной компенсации (УАК) токов однофазной утечки на базе автономного инвертора напряжения.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- исследовать возможности и принципы реализации УАК с релейным регулятором;
- обосновать и разработать методику расчёта параметров схемы УАК применительно выбранного алгоритма работы.

Результаты исследований.

Для анализа процессов применим схему замещения для случая однофазной утечки на землю, приведенную на рис.1 и РИТ, приведенную на рис.2. Диаграммы напряжения и токов для установившегося режима (по основной гармонике) исследуемой схемы замещения приведены на рис.3.

Напряжение смещения нейтрали и емкостная составляющая тока утечки связаны известными соотношениями: $u_N = U_m \cdot \sin \omega t$, $i_C = I_{cm} \cos \omega t$, где U_m , I_{cm} – амплитуды переменной составляющей напряжения нейтрали и емкостной составляющей тока утечки, ω – угловая частота напряжения сети.

© Шавелкин А. А., Белобородько О. А., 2011

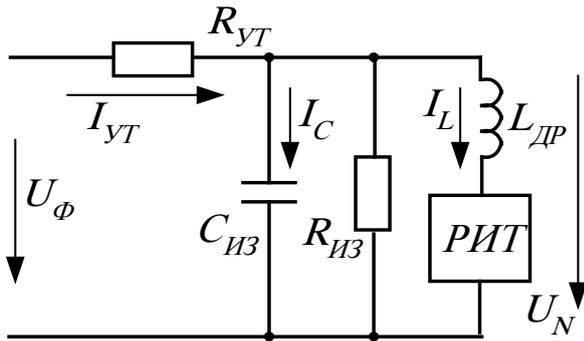


Рисунок 1 - Схема замещения исследуемой сети

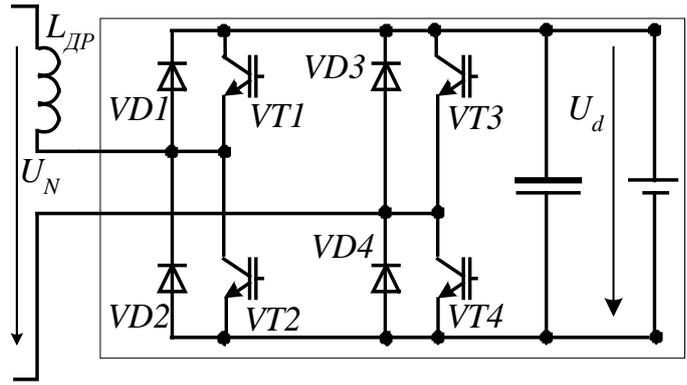


Рисунок 2 - Схема регулируемого источника тока

Рассмотрим работу РИТ при использовании релейного регулятора с постоянным заданным отклонением регулируемого параметра Δi .

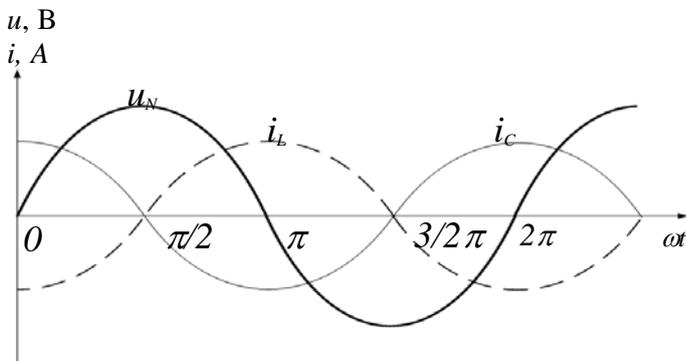


Рисунок 3 - Диаграммы напряжения и токов

Параметры РИТ U_d , $L_{ДР}$, частота переключения ключей РИТ f , включая заданное отклонение регулируемого параметра тока Δi могут быть рассчитаны для установившегося режима работы РИТ исходя из скорости изменения тока i_C и i_L . При этом на участке нарастания

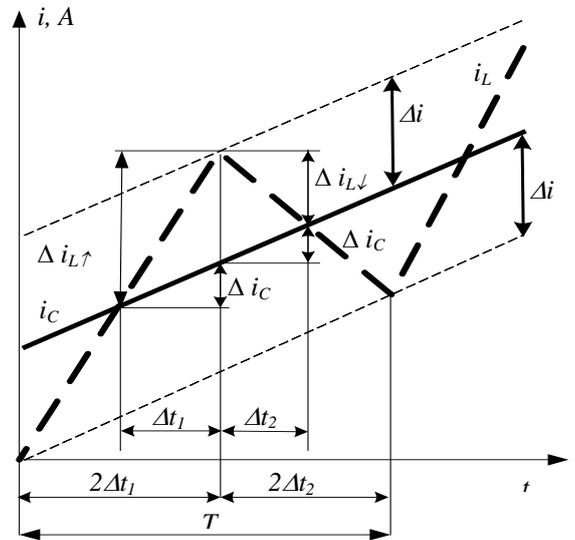


Рисунок 4 – Работа РИТ при нарастании тока

(рис.4) $\frac{di_{LH}}{dt_1} > \frac{di_C}{dt_1}$, а на участке убывания наоборот. Анализ показывает, что для определения параметров РИТ достаточно рассмотреть случай, когда $u_N > 0$.

Скорость нарастания значения тока $\frac{\Delta i_{LH}}{\Delta t_1}$ и заданное отклонение регулируемого параметра тока Δi на интервале $2\Delta t_1$:

$$\frac{\Delta i_{LH}}{\Delta t_1} = \frac{u_N + U_d}{L_{ДР}},$$

$$\Delta i = \Delta i_{LH} - \Delta i_C = \frac{u_N + U_d}{L_{ДР}} \cdot \Delta t_1 + \omega I_{cm} \sin \omega t \cdot \Delta t_1.$$

Откуда:
$$\Delta t_1 = \frac{\Delta i}{\frac{u_N + U_d}{L_{ДР}} + \omega I_{cm} \sin \omega t}.$$

Скорость убывания значения тока $\frac{\Delta i_{LY}}{\Delta t_2}$ и заданное отклонение регулируемого параметра тока Δi на интервале $2\Delta t_2$:

$$\frac{\Delta i_{LY}}{\Delta t_2} = \frac{u_N - U_d}{L_{ДР}},$$

$$\Delta i = -\Delta i_{LY} + \Delta i_C = \frac{U_d - u_N}{L_{ДР}} \cdot \Delta t_2 - \omega I_{cm} \sin \omega t \cdot \Delta t_2.$$

$$\text{Откуда: } \Delta t_2 = \frac{\Delta i}{\frac{U_d - u_N}{L_{ДР}} - \omega I_{cm} \sin \omega t}.$$

Период переключения транзисторов РИТ:

$$T = 2\Delta t_1 + 2\Delta t_2 = \frac{2\Delta i}{\frac{u_N + U_d}{L_{ДР}} + \omega I_{cm} \sin \omega t} + \frac{2\Delta i}{\frac{U_d - u_N}{L_{ДР}} - \omega I_{cm} \sin \omega t} \quad (1)$$

Частота переключения транзисторов РИТ :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{U_d}{4\Delta i L_{ДР}} - \frac{L_{ДР} \omega^2 I_{cm}^2 \sin^2 \omega t}{4\Delta i U_d} - \frac{u_{Nm}^2}{4\Delta i L_{ДР} U_d} - \frac{u_N \omega I_{cm} \sin \omega t}{2\Delta i U_d} \quad (2)$$

Для анализа выражения (1) рассмотрим три случая.

1. Длительность участка нарастания и участка спада тока равны и $u_N = 0$ (участок в области максимального значения тока i_L на рис. 3):

$$T = \frac{4\Delta i L_{ДР}}{U_d}.$$

Максимальная частота переключения транзисторов:

$$f_{\max} = \frac{U_d}{4\Delta i L_{ДР}}. \quad (3)$$

2. Сигнал задания по току существует, а u_N стремится к 0 (участок в области максимального и минимального значения тока i_L на рис. 3):

$$T = \frac{2\Delta i}{\frac{U_d}{L_{ДР}} + \omega I_{cm} \sin \omega t} + \frac{2\Delta i}{\frac{U_d}{L_{ДР}} - \omega I_{cm} \sin \omega t} = \frac{4\Delta i U_d}{\frac{U_d^2}{L_{ДР}} - L_{ДР} \cdot \omega^2 I_{cm}^2 \sin^2 \omega t}.$$

Частота переключения транзисторов, обусловленная влиянием скорости изменения сигнала задания по току:

$$f = \frac{U_d}{4\Delta i L_{ДР}} - \frac{L_{ДР} \omega^2 I_{cm}^2 \sin^2 \omega t}{4\Delta i U_d} = f_{\max} - f_0.$$

f_0 - составляющая, обусловленная влиянием скорости изменения сигнала по току.

3. Сигнал задания по току равен нулю, а $u_N = U_N$ (участок в области максимального значения u_N на рис.3):

$$T = \frac{2\Delta i L_{ДР}}{u_N + U_d} + \frac{2\Delta i L_{ДР}}{U_d - u_N} = \frac{4\Delta i L_{ДР} U_d}{U_d^2 - u_N^2}.$$

Минимальная частота переключения транзисторов:

$$f_{\min} = \frac{U_d}{4\Delta i L_{ДР}} - \frac{u_N^2}{4\Delta i L_{ДР} U_d} = \frac{U_d}{4\Delta i L_{ДР}} - \frac{U_{Nm}^2}{4\Delta i L_{ДР} U_d} = f_{\max} - f_1.$$

f_1 - составляющая, обусловленная влиянием u_N .

Выражение (2) можно представить в следующем виде:

$$f = \frac{1}{T} = f_{\max} - f_0 - f_1 - \frac{u_N \omega I_{cm} \sin \omega t}{2\Delta i U_d},$$

где $\frac{u_N \omega I_{cm} \sin \omega t}{2\Delta i U_d}$ - составляющая, обусловленная влиянием u_N и i_c .

Исходя из условия, что напряжение источника должно быть на 5% выше амплитуды напряжения сети (с учётом потерь в ключах и дроселе) $U_{d\phi} \approx 1.05 \cdot U = 980$ ($U_\phi = 660$ В).

Частота переключения ключей (2) зависит от индуктивности дросселя и заданного отклонения регулируемого параметра тока Δi . Чем меньше индуктивность дросселя тем меньше его стоимость и габариты, а чем меньше Δi , тем меньше амплитуда высокочастотных пульсаций и тока i_L . При пассивной компенсации (с учетом разделительного конденсатора 10 мкФ, индуктивность дросселя составляет 4.4 Гн. В данном случае индуктивность дросселя может быть значительно ниже. Ее величина определяется f_{max} в соответствии с характеристиками транзисторов при ограничении динамических потерь мощности в них (см. ниже). С другой стороны $L_{др}$ зависит от Δi , которое определяет амплитуду высокочастотной составляющей тока i_L (I_{Lmax}). Величину Δi можно принять равную $\Delta i \leq 0.1 \cdot I_{Lmax}$ (I_{Lmax} при ёмкости изоляции 1 мкФ на фазу составляет 0.84 А), чтобы минимизировать влияние высокочастотной составляющей на человека и другие устройства. Приняв $\Delta i = 10$ мА, то $L_{др} = 0.35$ Гн. Задаваясь величиной $R_{ИЗ} = 60$ кОм и $C_{ИЗ} = 1$ мкФ на фазу для напряжения сети 1140 В, в соответствии с (2) получаем зависимость частоты переключения транзисторов РИТ $f(t)$ рис.5. При этом частота коммутации ключей изменяется в пределах (30-70 кГц) и применительно пульсаций тока имеем частотную модуляцию с широким спектром гармоник, что делает невозможным фильтрацию и выделение полезных составляющих сигналов от источника оперативного напряжения и измерителя ёмкости изоляции. Это особенно важно, когда $C_{ИЗ}$ изменяется в процессе утечки.

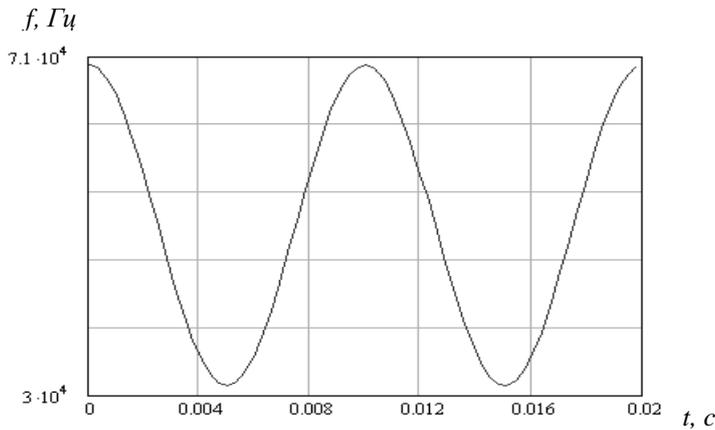


Рисунок 5 - Зависимость $f(t)$

Устранить это негативное воздействие РИТ можно используя релейный регулятор с постоянной частотой переключения транзисторов, что, например, достигается постоянным изменением Δi . Для величин $U_{\beta} = 980$, $L_{др} = 0.35$ Гн, $f = 70$ кГц при напряжения сети 1140 В, активном сопротивлении $R_{ИЗ} = 60$ кОм и ёмкости изоляции $C_{ИЗ} = 1$ мкФ на фазу используя (2) находим Δi . Зависимость $\Delta i(t)$ приведена на рис. 6. Данный метод изменения заданного отклонения регулируемого параметра тока привязан к основной гармонике i_L и сложен в практической реализации.

Другой способ реализации - при фиксированной частоте переключения ключей. Он осуществляется введением в схему релейного регулятора генератора импульсов фиксированной частоты f_H для принудительного переключения регулятора. Правда при этом поддерживается значение тока РИТ только на уровне $(i_{зад} + \Delta i)$, второй уровень переключения неконтролируемый. При достаточно высокой частоте f_H искажение формы тока не значительно. Если выбрать f_H порядка 70кГц, частота генератора измерителя емкости может быть выбрана 1кГц. При этом нет проблемы с фильтрацией сигналов.

Работа РИТ на участке нарастания тока в дросселе и тока в емкости изоляции сети показана на рис. 7. Период переключения транзисторов РИТ для одного контролируемого уровня тока:

$$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 = \frac{\Delta i_1}{\frac{u_N + U_d}{L_{др}} + \omega I_{cm} \sin \omega t} + \frac{\Delta i}{\frac{u_N + U_d}{L_{др}} + \omega I_{cm} \sin \omega t} + \frac{\Delta i}{\frac{U_d - u_N}{L_{др}} - \omega I_{cm} \sin \omega t} + \frac{\Delta i_2}{\frac{U_d - u_N}{L_{др}} - \omega I_{cm} \sin \omega t} \tag{4}$$

$T_M = \frac{1}{f_H}$ - фиксированный период импульсов для принудительного переключения регулятора.

Зависимость отклонения регулируемого параметра тока $\Delta i_i(t)$ при фиксированной частоте переключения ключей в соответствии с (4) для граничного варианта при $\Delta i = 8$ мА, $U_{\beta} = 980$, $L_{др} = 0.35$ Гн приведена на рис.6.

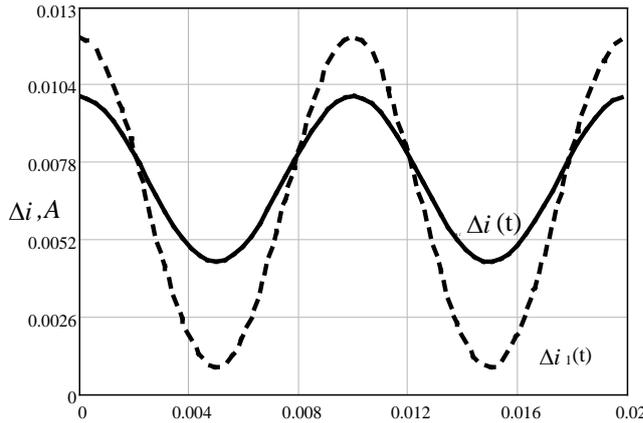


Рисунок 6 - Зависимость Δi(t)

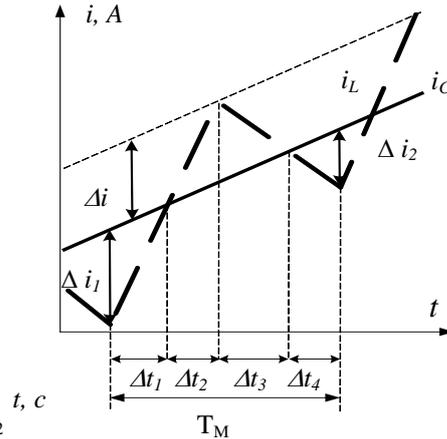


Рисунок 7 - Работа РИТ при одном пороге срабатывания

Графики изменения заданного отклонения регулируемого параметра тока Δi рис. 6 и рис.8 практически идентичны, следовательно выбираем вариант реализации системы автоматического регулирования с релейным регулятором для одного контролируемого уровня тока, как более простого в практической реализации.

Расчет РИТ при фиксированной частоте переключения ключей аналогичен синусоидальной ШИМ [4]. Действующее значение тока транзистора за период фиксированного переключения:

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\pi} \gamma^2 \cdot I_{cm}^2 \cdot \cos^2(\omega t) \cdot d(\omega t)} = 0.4 \text{ (A)}$$

где $\gamma = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{T}$ - коэффициент заполнения импульсов.

$$\gamma = \frac{\Delta i_1 \cdot L_{DP}}{(U_{m \cdot DP} \sin \omega t + U_{cm} + L \cdot \omega \cdot I_m \sin \omega t) \cdot T} + \frac{\Delta i \cdot L_{DP}}{(U_{d \cdot DP} \sin \omega t + U_{cm} + L \cdot \omega \cdot I_m \sin \omega t) \cdot T}$$

Зависимость $\gamma(t) = 0,5 - 0,5 \mu \sin \omega t$, $\mu = 0.75$ приведена на рис. 8.

Среднее значение тока транзистора за период выходной частоты РИТ:

$$I_{VTCP} = -\frac{1}{T} \int_0^{\pi} \gamma \cdot I_{cm} \cdot \cos(\omega t) d\omega t = 0.21 \text{ (A)}$$

Выбираем IGBT транзисторы Advance Technical Data IXBH 42N170A ($U_{CES} = 1700 \text{ V}$, $I_{ref} = 21 \text{ A}$) с обратным диодом по методике описанной в [6].

Потери мощности в транзисторах РИТ определяется суммой статических и динамических потерь по методике [6].

Статические потери мощности (потери проводимости) в транзисторе:

$$P_{cond(IGBT)} = (I_{VTcp} \cdot U_{TO} + I_{VT}^2 \cdot R_{CE}) = 0.3 \text{ (Вт)},$$

$U_{TO} = 1 \text{ В}$ - напряжение отсечки транзистора [5].

R_{CE} - динамическое сопротивление транзистора (паспортные данные) [5].

Статические потери мощности (потери проводимости) в диоде:

$$P_{condD} = (I_{VDcp} \cdot U_T + I_{VD}^2 \cdot R_T) = 0.25 \text{ (Вт)}$$

$U_T = 1.1 \text{ В}$ - напряжение отсечки диода (паспортные данные) [5].

R_T - динамическое сопротивление диода (паспортные данные) [5].

Динамические потери мощности в транзисторе:

$$P_{SW(IGBT)} = f_{SW} \cdot E_{(on+off)IGBT} \cdot \left(\frac{I_{VTcp}}{I_{ref}}\right)^{K_I} \cdot \left(\frac{U_d}{U_{CC}}\right)^{K_U} = 1.5 \text{ (Вт)}$$

где $f_{SW} = 70000 \text{ (Гц)}$ - частота переключения транзисторов

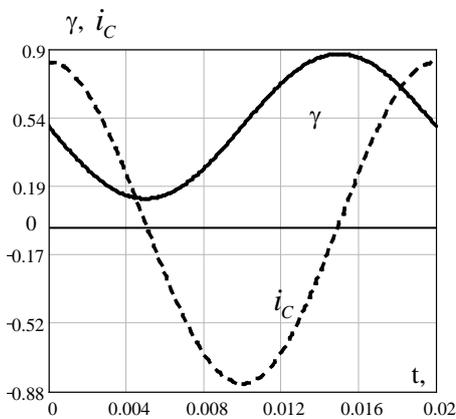


Рисунок 8 - Зависимость γ(t)

$E_{(on+off)IGBT}=0.0028$ (Дж) – суммарное значение энергии включения и выключения транзисторов

K_I, K_U — эмпирические коэффициенты, учитывающие изменение энергии потерь при изменении рабочего тока и напряжения. Они имеют следующие значения: $K_U = 1,35$ (для 1700 В) $K_I = 1$ (для IGBT).

Динамические потери мощности в диоде:

$$P_{SWD} = f_{SW} \cdot E_{(RR)D} \cdot \left(\frac{I_{VDcp}}{I_{ref}} \right)^{K_I} \cdot \left(\frac{U_d}{U_{CC}} \right)^{K_U} = 1.6 \text{ (Вт)}$$

$E_{(RR)D}=0.001$ (Дж) – суммарное значение энергии включения и выключения диода

K_I, K_U — эмпирические коэффициенты, учитывающие изменение энергии потерь при изменении рабочего тока и напряжения. Они для диода имеют следующие значения: $K_U = 0.6$ (для 1200 В) $K_I = 0.6$.

Суммарные потери IGBT транзисторов в РИТ [6]:

$$P_{\Sigma} = 4 \cdot (P_{cond(IGBT)} + P_{condD} + P_{SW(IGBT)} + P_{SWD}) = 14.6 \text{ (Вт)}$$

Расчёт емкости на входе РИТ, выполняем из условия, что коэффициент пульсации напряжения на емкости составляет 5% [4]:

$$C = \frac{U_{AHH}^1 \cdot I_C^1}{U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot K_{II}} = 13.7 \text{ мкФ,}$$

где I_C^1 - действующее значение основной гармоники тока в емкости изоляции;

U_{AHH}^1 – действующее значение основной гармоники напряжения на выходе РИТ;

U – напряжение постоянного источника питания РИТ, выбирается на 5% выше амплитудного значения фазного напряжения сети;

K_{II} - коэффициент пульсаций напряжения на емкости.

Выводы.

1. Показано, что для практической реализации с позиции обеспечения фиксированной частоты приемлемое решение достигается с использованием релейного регулятора с одним порогом и принудительным переключением.

2. Показано, что предложенные решения могут быть реализованы с использованием существующей элементной базы при минимальных потерях в РИТ.

3. Дальнейшее исследование связаны с лабораторными испытаниями макетного образца УАК на напряжении 660В при различных параметрах сети и исследование возможности реализации автокомпенсации при изменении параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан // М.: Недра, 1982. - 152 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 // Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. – 2005.-Вип.75. –С.39-44.

3. Шавёлкин А.А. Вариант реализации реле утечки для сетей с изолированной нейтралью с компенсацией тока однофазной утечки / А.А. Шавёлкин, О.А. Белобородько // Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. – 2006 - Вип. 77.- С.74-80

4. Шавьолкін О.О. Перетворювальна техніка: навчальний посібник / О.О. Шавьолкін, О.М. Налівайко. – Краматорськ: ДДМА, 2008.-328с.

5. <http://www.alldatasheet.net/view.jsp?Searchword=IXBH42N170A>

6. Колпаков А. И. Принципы работы и особенности программы теплового расчета SemiSel / А. И. Колпаков // Электронные компоненты. – 2004. № 6.

Надійшла до редколегії 02.12.2010

Рецензент: О.П.Ковальов

О.О. ШАВЬОЛКІН, О.О. БІЛОБОРОДЬКО
Донецький національний технічний університет

A. SHAVYOLKIN, O. BILOBORODKO
Donetsk National Technical University

Принципи реалізації джерела струму в пристрої активної компенсації струму однофазного витоку. У статті розглянуті питання вдосконалення характеристик пристрою активної компенсації однофазних струмів витоку на базі автономного інвертора напруги в режимі джерела струму.

Principles of Realization of a Current Source in the Device of the Active Compensating of Single-Phase Leak Current. In the given article the questions of improving the characteristics of the device of the active compensating of single-phase leak current on the basis of a voltage source inverter in the mode of current source are considered.