

## Сверхпроводниковые токоограничители для энергосистем

Ш.И. Лутидзе, Л.С. Флейшман

ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», 119991, Москва, Россия

В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

И.И. Акимов, А.К. Шиков

ФГУП «Всероссийский НИИ Неорганических материалов им. А.А.Бочвара», 123060, Москва, Россия

Рассмотрен принцип действия токоограничивающих устройств энергетического назначения со сверхпроводниковым нелинейным резистором. Приведены результаты численных расчетов электромагнитных процессов в цепях с токоограничителем такого типа. Описана конструкция лабораторного макета токоограничителя с использованием композитного ВТСП провода и приведены результаты экспериментов.

Рост уровней токов короткого замыкания (КЗ) предъявляет повышенные требования к обеспечению электродинамической и термической стойкости электротехнического оборудования и надежности его работы в режимах КЗ.

Особенно актуальной эта проблема становится для сверхпроводникового (СП) электрооборудования: СП трансформаторов, СП генераторов, СП линий электропередачи и т.д. Внутренние сопротивления СП электрооборудования по сравнению с их значениями у традиционного оборудования значительно снижены, вследствие чего токи КЗ могут принимать недопустимо высокие значения.

К средствам ограничения токов КЗ относятся токоограничители (ТО). Основное требование к ТО заключается в том, что ударное и установившееся значение тока КЗ в электрической сети, в которой он установлен, не должно превышать предельно допустимой величины. Кроме того, ТО не должен негативно сказываться на параметрах электроэнергетической системы при нормальном режиме работы.

Эффективным способом ограничения токов КЗ является использование сверхпроводниковых токоограничителей (СПТО). Принцип действия быстродействующих СПТО, рассмотренных в настоящей работе, основан на нелинейности вольтамперной характеристики (ВАХ) сверхпроводника, сопротивление которого меняется в зависимости от величины тока [1].

Схема индуктивного СПТО переменного тока трансформаторного типа с ВТСП нелинейным резистором в качестве нагрузки вторичной обмотки трансформатора приведена на рис. 1. Нелинейный элемент в СПТО выполнен в виде СП резистора с малой индуктивностью. В нормальном режиме сети

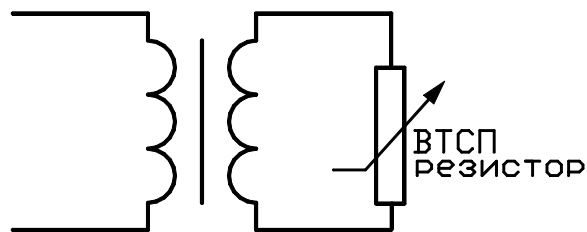


Рис. 1. Электрическая схема ВТСП ТО трансформаторного типа.

вторичная обмотка трансформатора замкнута на резистор в сверхпроводящем состоянии, при этом сопротивление ТО имеет низкое значение. Когда в сети происходит КЗ, резистор теряет сверхпроводимость и переходит в резистивное состояние. В результате этого ток КЗ ограничивается индуктивным сопротивлением первичной обмотки.

Результаты численного моделирования, приведенные на рис. 2, позволяют сравнить

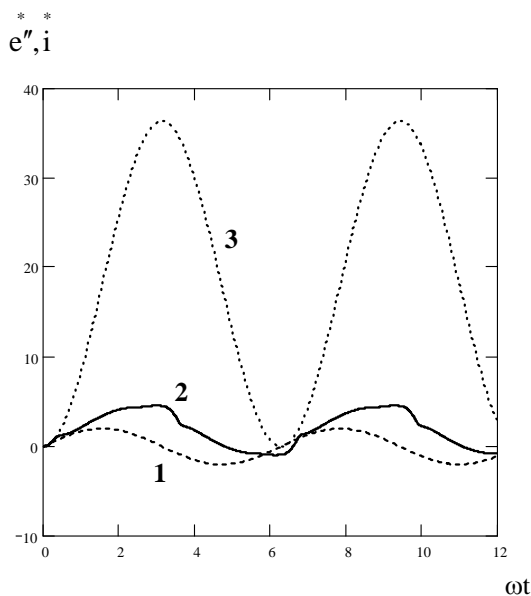


Рис. 2. Результаты расчета (в относительных единицах) переходного процесса при КЗ в цепи с СПТО (2) и в его отсутствие (3).

расчетные токи КЗ в цепи при наличии СПТО и в его отсутствие. КЗ в цепи происходит в момент времени  $t=0$ . На рис. 2 приведены ЭДС СП генератора  $e^*$  (кривая 1), ток в цепи  $i$  в случае срабатывания СПТО (кривая 2) и в случае, когда СПТО отсутствует (кривая 3). Применение СПТО позволяет снизить на порядок величину тока КЗ.

Для экспериментальной проверки описанного принципа действия был изготовлен макетный образец СПТО. Для изготовления нелинейного резистора использовался композитный ВТСП провод на основе сверхпроводника Bi-2223 в серебряной матрице. Многожильный (состоящий из 61 керамической сверхпроводящей жилы в матрице из нелегированного серебра) ленточный ВТСП-композит был изготовлен во ВНИИНМ им. А.А.Бочвара методом «порошок-в трубе».

Конструктивное исполнение макета ВТСП ТО трансформаторного типа приведено на рис. 3.

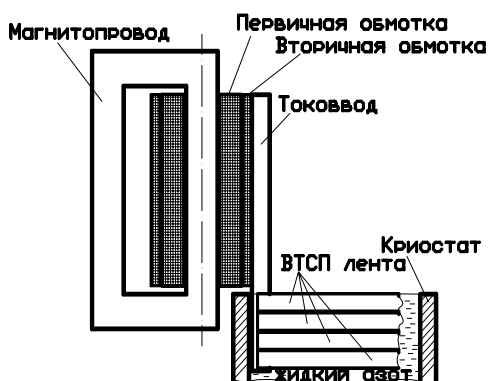


Рис. 3. Конструктивная схема макета ВТСП ТО.

Первичная (рабочая) и вторичная обмотки трансформаторной части макета ТО выполнены из медного проводника, магнитопровод - из электротехнической стали, криостат - из пенопласта. К концам вторичной обмотки присоединялись медные токовводы. Концы токовводов и присоединенные к ним ВТСП провода погружались в жидкий азот. Измерения на макете ВТСП ТО проводились на переменном токе промышленной частоты в установившемся режиме.

Зависимость импеданса  $Z$  макета ВТСП ТО от рабочего тока приведена на рис. 4. На этой зависимости можно выделить три области: при токах  $0 \div 0,3$  А - область низкого значения  $Z \approx 1,2$  Ом; при токах  $0,3 \div 4$  А - переходная область, в которой импеданс плавно возрастает с ростом тока до значения  $Z \approx 4,5$  Ом; при токах свыше 4 А - область высокого значения импеданса. Следует подчеркнуть, что во всех областях приведенной на рис.4 зависимости режим СПТО является стационарным и воспроизводимым.

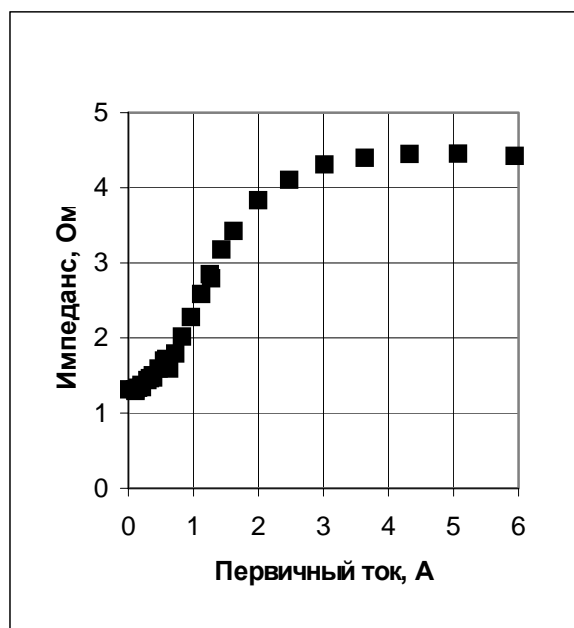


Рис. 4. Зависимость импеданса макета ВТСП ТО от тока в рабочей (первичной) обмотке.

На рис. 5 приведены осциллограммы тока в цепи с ВТСП ТО и напряжения на нем в режиме ограничения тока. Видно, что напряжение на ВТСП ТО является синусоидальным, а ток значительно отличается от синусоидального. Зависимость тока от времени характеризуется сглаженными вершинами синусоиды, что вызвано безынерционным токоограничивающим действием рассматриваемого устройства.

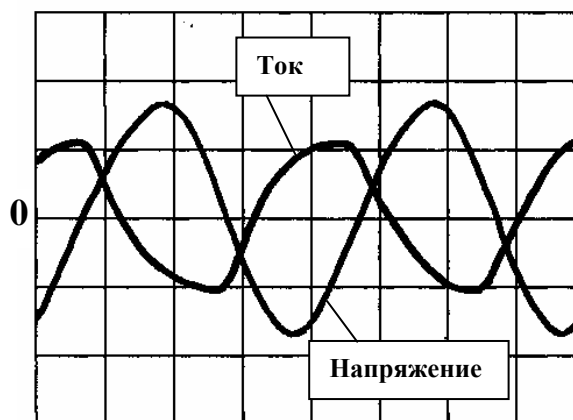


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на макете ВТСП ТО и тока в цепи в режиме увеличения импеданса ТО при росте тока. Ток рабочей обмотки - 1,8 А; частота - 50 Гц

Результаты экспериментов на макете ВТСП ТО со сверхпроводниковым нелинейным резистором подтверждают работоспособность токоограничителя описанного типа.

1. Е. Л. Блинков, Ш. И. Лутидзе, Э. А. Джафаров, Л. С. Флейшман, ЭЛЕКТРО, 6, 39, (2003).