

УДК 621.314.58

Исследование работы последовательных тиристорных источников реактивной мощности в аварийных режимах

Е.Е. Чаплыгин, К.В. Расули

Сведения об авторах

Чаплыгин Евгений Евгеньевич — кандидат технических наук, профессор кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: tutchevan@mail.ru

Расули Кирилл Вячеславович — аспирант кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», младший научный сотрудник лаборатории преобразовательной техники им. К.А. Круга ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского»

Для решения задачи снижения токовой загрузки отдельных ЛЭП в мировой практике используются устройства гибких линий электропередачи (FACTS). Один из способов решения поставленной задачи — применение последовательных источников реактивной мощности (ИРМ).

Рассмотрена работа однофазных и трехфазных источников реактивной мощности (ИРМ), используемых в гибких линиях электропередачи (FACTS), при возникновении коротких замыканий трех типов. Приведена принципиальная возможность ограничения токов коротких замыканий при помощи последовательных ИРМ. Проведен обобщенный расчет токов коротких замыканий и определены критерии наихудших режимов. Анализ показал, что амплитуда тока через реактор и тиристоры зависит от индуктивности реактора, амплитуды и фазы напряжения короткого замыкания. Наибольшая амплитуда тока через тиристоры отмечается в тех режимах, когда момент короткого замыкания соответствует началу положительной полуволны напряжения короткого замыкания. При помощи имитационного моделирования выведены временные диаграммы характерных переходных процессов и указаны максимальные значения параметров ИРМ при различных значениях индуктивности реактора. Предложена методика определения индуктивности реактора. Показано, что устройство во всех случаях ограничивает аварийные токи, протекающие в полупроводниковых вентилях, а ток линии может быть ограничен в ряде случаев на участке с включенным ИРМ и зависит от сопротивления контура на резонансной частоте. Наибольшие токи в наихудшем режиме при одинаковых значениях индуктивности реактора протекают при трехфазном коротком замыкании в системе с трехфазным ИРМ как при КЗ на землю, так и при междуфазном КЗ. В однофазных ИРМ при трехфазном и однофазном КЗ максимальные токи одинаковы и меньше по величине.

Ключевые слова: источник реактивной мощности, аварийный режим, токоограничивающий реактор.

Studying the operation of series reactive power sources in emergency modes

Е.Е. Chaplygin, K.V. Rasuli

Information about authors

Chaplygin Evgeniy E. — Ph.D. (Techn.), professor of industrial electronics dept., MPEI, e-mail: tutchevan@mail.ru

Rasuli Kirill V. — Ph.D.-student of industrial electronics dept., MPEI, junior researcher of laboratory converter equipment named K.A. Krug of «Energy Institute named G.M. Krzhizhanovsky»

Flexible AC transmission systems (FACTS) are used around the world for decreasing the current load of individual power transmission lines. One of the ways in which the above-mentioned problem can be solved consists in using series reactive power sources (RPSs).

The operation of single-phase and three-phase series RPSs used in flexible AC transmission systems under the conditions of three types of short circuit faults is considered. The possibility in principle of limiting short circuit currents by means of series RPSs is shown. A generic calculation of short circuit currents is carried out, and criteria for the worst-case operating modes are determined. An analysis has shown that the amplitude of current through the reactor and thyristors depends on the reactor inductance and on the short-circuit voltage amplitude and phase. The highest amplitude of current through the thyristors is observed in the modes when the short-circuit fault instant coincides with the beginning of the short-circuit voltage's positive half-wave. Timing diagrams of the characteristic transients are obtained by simulation, and the maximum values of RPS parameters are indicated at different values of reactor inductance. A procedure for determining the reactor inductance is suggested. It is shown that the device always limits the fault currents through the semiconductor switches, and that in a number of cases the transmission line current can be limited in the line section containing the RPS to an extent that depends on the circuit impedance at the resonance frequency. At the given reactor inductance, the highest currents in the worst-case mode will flow under the conditions of a three-phase short-circuit fault in the system equipped with a three-phase RPS in case of both ground and line-to-

line short-circuit faults. The maximal currents flowing through single-phase RPSs in case of three- and single-phase short-circuit faults are equal to each other and are characterized by smaller values.

Key words: reactive power source, emergency mode, current-limiting reactor.

В современной электроэнергетике при передаче электроэнергии по параллельным ЛЭП разного напряжения возникает проблема чрезмерной загрузки током линии более низкого напряжения при недогрузке линии более высокого напряжения. Для решения подобных задач в мировой практике используются устройства гибких линий электропередачи (FACTS).

В настоящее время существует ряд вариантов решения этой задачи, которые большей частью находятся в стадии проектной проработки [1]. Такие устройства имеют в основе своего принципа действия либо введение вольтдобавки, либо введение регулируемого реактивного сопротивления. Однако применение для решения поставленной задачи последовательных источников реактивной мощности (ИРМ), выполненных на тиристорах и работающих в режиме источника тока, не затронуто исследователями [1].

Рассмотрено применение гибридного тиристорного источника реактивной мощности (ИРМ) на базе преобразователя постоянного/переменного тока с индуктивным накопителем энергии, подключаемого последовательно к линии электропередачи [1]. Последовательные ИРМ позволяют не только плавно регулировать ток линии, но и осуществлять защиту силового оборудования при возникновении режимов короткого замыкания в сети. Преимуществом устройства является и построение его на базе тиристорных, применение которых в высоковольтных устройствах детально проработано.

Принципы функционирования ИРМ, а также режимы работы и зависимости режимов от параметров ЛЭП и элементов ИРМ были рассмотрены в [1]. Определение комплекса действий, производимых для предупреждения урона при появлении аварийного режима, является задачей данного исследования. Необходимо обеспечить максимальную сохранность оборудования ИРМ, а также по возможности снизить влияние нештатных режимов на энергосистему, в частности, линию электропередачи с включенным ИРМ.

Структура и принцип действия устройства

Возможно применение трех однофазных ИРМ или одного трехфазного преобразователя. Рассмотрим работу однофазного ИРМ (рис. 1, а). К линии с сопротивлением $Z_{\text{лин}}$ приложена разность напряжений источников напряжения e_1 и e_2 с внутренним сопротивлением Z_1 и Z_2 соответственно. Источник реактивной мощности состоит из тиристорного преобразователя на базе преобразователя постоянного/переменного тока, с одной стороны подключенного через трансформатор к ЛЭП, а с другой стороны имеющего индуктивный накопитель энергии L_d [2, 3]. Ток ЛЭП жестко связан с током накопителя, и задается при функционировании системы управления ИРМ с обратной связью по току.

Тиристорный преобразователь в режиме источника реактивной мощности функционирует на границе выпрямительного и инверторного режимов. Для увеличения (уменьшения) тока реактора угол задержки включения α уменьшается (увеличивается). В установленном режиме значение угла задержки включения балансирует вблизи $\alpha = 90$ градусов. Сдвиг угла α в сторону выпрямительного режима позволяет скомпенсировать потери в преобразователе [3]. На стороне переменного тока тиристорный блок формирует импульсы тока прямоугольной формы. Со стороны переменного тока устройство зашунтировано пассивным фильтром в виде резонансного LC -контура с частотой резонанса, равной частоте сети. Пассивный фильтр замыкает на себя высокочастотные гармоники, генерируемые тиристорным преобразователем, и обеспечивает синусоидальность токов линии.

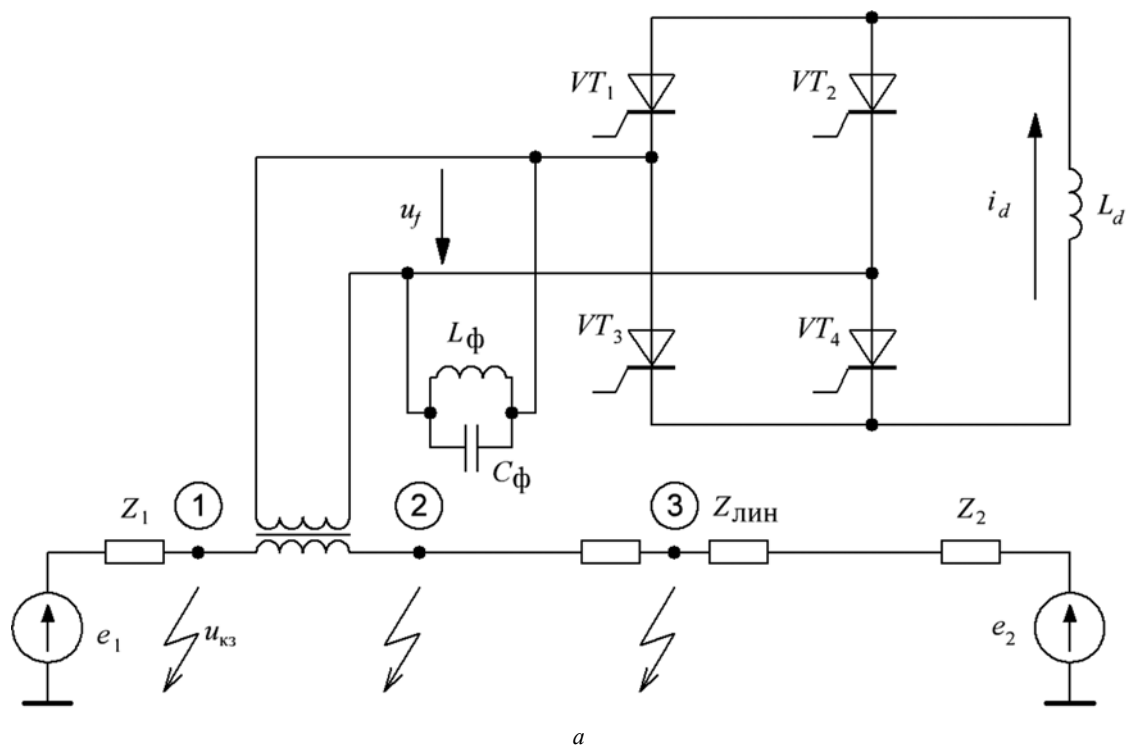
Коэффициент трансформации $k_{\text{тр}}$ выбирается таким образом, чтобы обеспечить в любых режимах (в том числе аварийных) допустимое напряжение на тиристорах (тиристорных столбах).

Индуктивный накопитель L_d на стороне постоянного тока ИРМ на разных частях периода сети подключается последовательно к ЛЭП, что позволяет рассматривать L_d как токоограничивающий реактор во время протекания аварийного процесса. В связи с тем, что задача ограничения токов КЗ возлагается на реактор L_d , индуктивности рассеяния трансформатора могут быть выбраны минимальными.

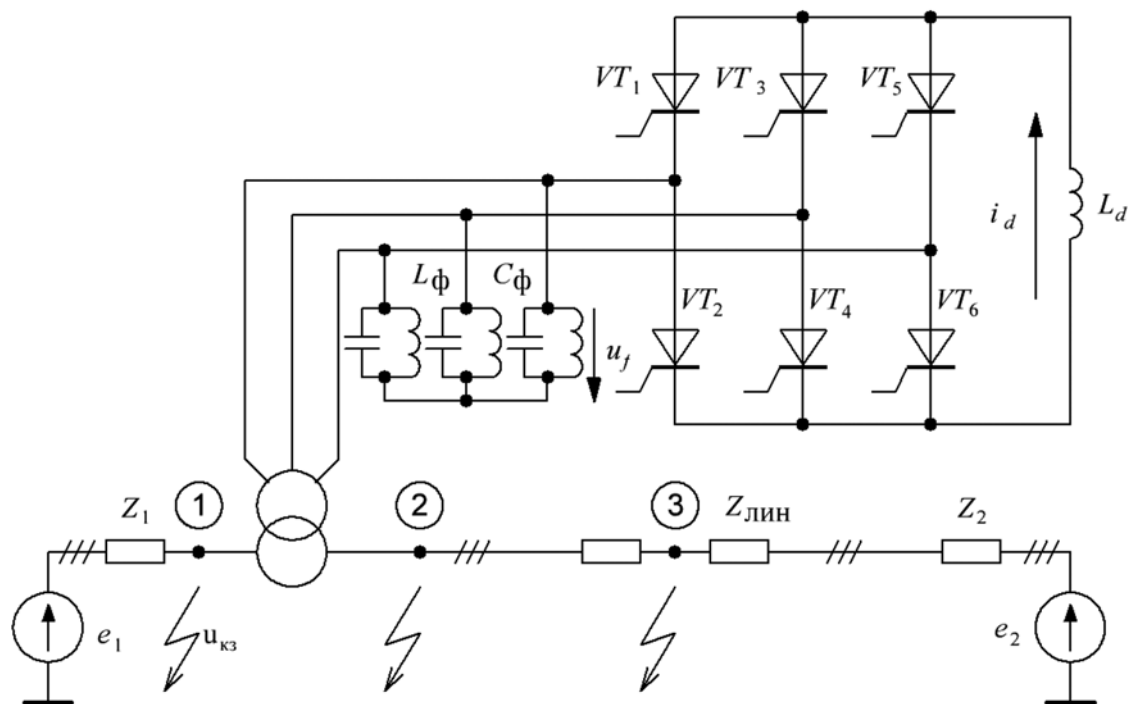
В трехфазном варианте ИРМ используется трехфазный тиристорный мост, включаемый в линию электропередачи через трансформаторы (рис. 1, б).

Под аварийными процессами в общем случае понимаются различные короткие замыкания. Их классификация должна быть принята и использована для выбора методики исследования. Последовательный источник реактивной мощности, как следует из названия, включается в рассечку линии электропередачи. На данном этапе задачей ставится рассмотрение внешних коротких замыканий. Так как ИРМ включается через трансформатор, ему присущи те же аварийные режимы, что и трансформаторам. Опираясь на это, будут исследованы следующие виды внешних коротких замыканий для двух реализаций ИРМ (одно- и трехфазной).

1. Одно- или трехфазное короткое замыкание на землю между источником e_1 и местом включения ИРМ в линию. В данном случае ток КЗ источника e_1 ограничивается только внутренним сопротивлением источника Z_1 . Функционирование ИРМ ограничивает ток, протекающий через источник e_2 , линию электропередачи и первичную обмотку трансформатора ИРМ.



а



б

Рис. 1. Схема подключения однофазного (а) и трехфазного (б) ИРМ

2. Одно- или трехфазное короткое замыкание на землю между местом включения ИРМ и линией электропередачи от места включения ИРМ. В данном случае ИРМ ограничивает ток КЗ источника e_1 , а ток e_2 ограничивается только сопротивлением ЛЭП и внутренним сопротивлением источника Z_2 .

3. Одно- или трехфазное короткое замыкание на землю в произвольном месте на протяжении линии. Данный случай аналогичен случаю 2.

4. Междофазное короткое замыкание в произвольном месте на протяжении линии.

Точки КЗ, соответствующие указанным режимам показаны на рис. 1, а, б.

Обобщенный анализ электромагнитных процессов

Основными параметрами коротких замыканий являются амплитуда тока короткого замыкания и длительность переходного процесса. В зависимости от этих параметров можно оценить реакцию ИРМ и системы в целом на аварийный процесс, а также сделать выводы как о возможном уроне оборудованию, так и влиянии КЗ на ЛЭП. Необходимо проанализировать переходные процессы следующих основных величин: напряжение на пассивном фильтре, ток пассивного фильтра, ток тиристоров, ток реактора, ток частей линии, разделенных точкой КЗ.

Проведем анализ процессов в обобщенном виде. До момента наступления короткого замыкания через реактор L_d протекал ток, задающий ток линии в номинальном режиме, который обозначим I_0 . В момент $\theta = 0$ происходит короткое замыкание и к реактору прикладывается синусоидальное напряжение амплитудой U_m , фаза этого напряжения ζ может быть любой. Ток реактора имеет две составляющие — свободную и принужденную:

$$i_d = i_{св} + i_{пр}.$$

Принужденная составляющая является синусоидальной, и определяется параметрами ЛЭП и генераторов:

$$i_{пр}(\theta) = \frac{U_m}{Z_L} \sin(\theta - \zeta - \varphi),$$

где Z_L — комплексное сопротивление реактора; φ — фазовый угол реактора. Потери при расчете принимаются равными 1% от реактивного сопротивления, при этом $\varphi = 89,4^\circ$.

Свободная составляющая характеризует процесс снижения тока в реакторе:

$$i_{св}(\theta) = A e^{\frac{\theta}{\tau}}.$$

Поскольку при $\theta = 0$ $i_d(0) = I_0$:

$$A = I_0 + \frac{U_m}{Z_L} \sin(\zeta + \varphi),$$

отсюда

$$i_d(\theta) = [I_0 + \frac{U_m}{Z_L} \sin(\zeta + \varphi)] e^{\frac{\theta}{\tau}} + \frac{U_m}{Z_L} \sin(\theta - \zeta - \varphi).$$

В момент возникновения короткого замыкания $\theta = 0$ управляющие импульсы на все тиристоры ИРМ блокируются, ток продолжает протекать через реактор до момента достижения значения тока удержания. Будем полагать ток удержания равным нулю.

Таким образом, амплитуда тока через реактор и тиристоры зависит от индуктивности реактора L_d , амплитуды и фазы напряжения короткого замыкания.

Наибольшая амплитуда тока через тиристоры отмечается в тех наихудших режимах, когда момент короткого замыкания соответствует началу положительной полуволны напряжения короткого замыкания. В этих режимах амплитуда тока i_d равна сумме тока I_0 и удвоенной амплитуде принужденной составляющей тока реактора.

Напряжение на реакторе повторяет форму напряжения ИРМ на стороне сети, если проводят ток тиристоры V_1 и V_2 (рис. 1, а) и противофазно ему в случае проводящего состояния V_3 и V_4 . Проводящее состояние тиристоров зависит от процессов в преобразователе до возникновения короткого замыкания. Поэтому возможны случаи, когда наихудший режим не наблюдается, ток реактора монотонно уменьшается и переходной процесс быстро завершается, но это определяется фазовым соотношением напряжений e_1 и e_2 , которое имеет вероятностный характер.

В обобщенной модели не учитывается наличие в схеме фильтрующего контура $L_\phi C_\phi$ и других реактивных элементов, а также амплитудная модуляция напряжения на ИРМ при наступлении короткого замыкания из-за переходных процессов в схеме высокого порядка. В связи с этим для более детального определения максимальных значений токов и напряжений элементов схемы в аварийном режиме применяется имитационное моделирование в базе Matlab-Simulink.

Результаты модельного эксперимента для однофазного ИРМ

При проведении модельного эксперимента исследуются процессы в наихудшем режиме: начало положительной полуволны напряжения короткого замыкания в момент $\theta = 0$. Напряжения генераторов и их фазы варьируются. Комплексное сопротивление линии составляет $Z_n = 33,09 + j126,86$ Ом. $Z_1 = Z_2 = 1 + j4$ Ом. Действующее значение номинального тока линии $I_{ном\ эфф} = 427$ А.

Источник реактивной мощности, как было сказано ранее, также в определенных случаях ограничивает ток короткого замыкания линии. С этой точки зрения, КЗ типа I является наиболее характерным. При междуфазном коротком замыкании приложенное к реактору напряжение является линейным, однако в образующемся контуре последовательно включены два ИРМ и токи короткого замыкания меньше. Переход преобразователя ИРМ в режим прерывистого тока определяет минимальное значение индуктивности реактора. Ток реактора при минимальном $L_d k_{тр} = 400$ мГн представлен на рис. 2, а.

Как было указано выше, необходимо определить требуемые значения индуктивности реактора для ограничения токов КЗ. Исходя из условия превышения током тиристоров в режиме короткого замыкания не более 50% от номинального по обобщенной модели

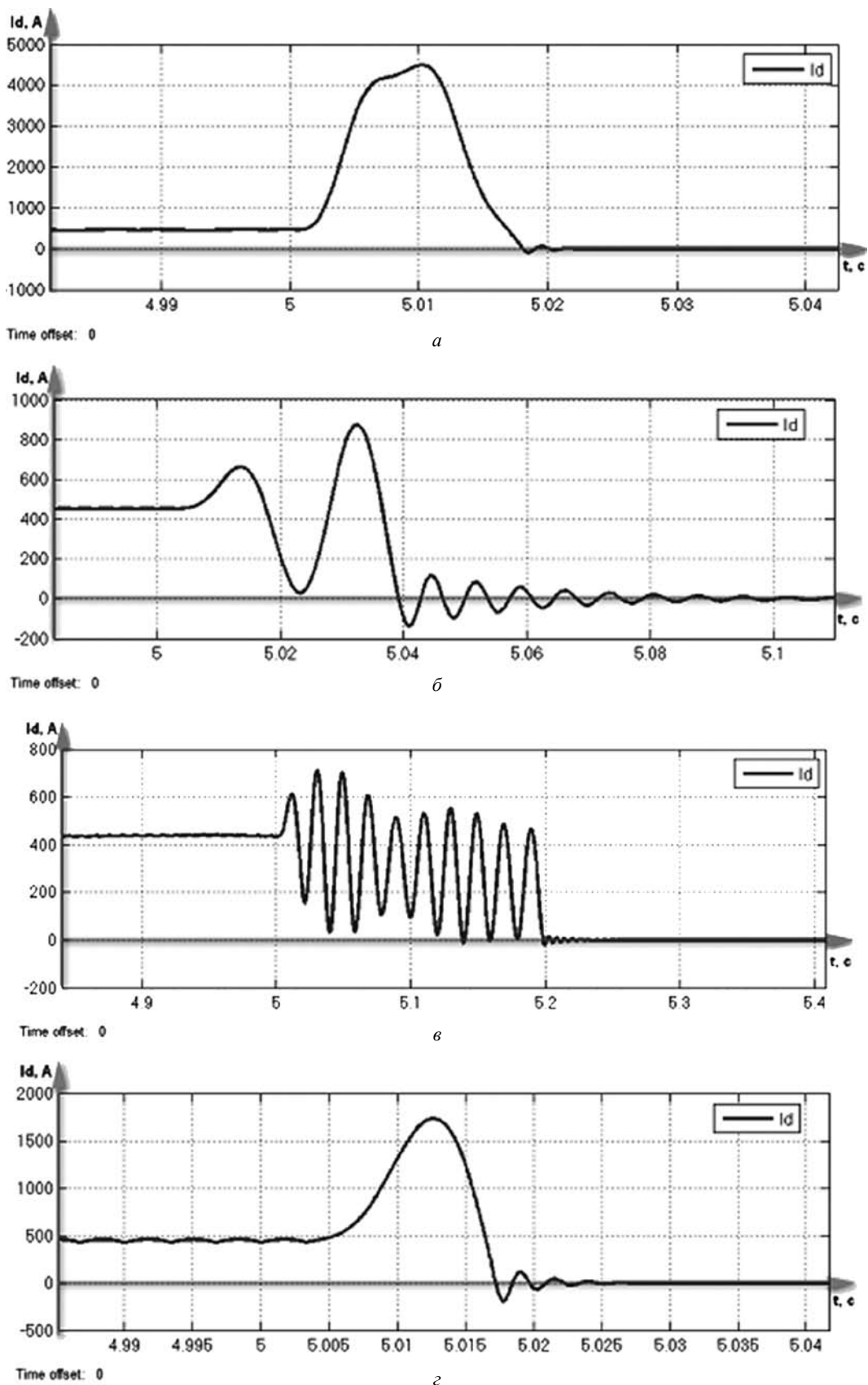


Рис. 2. Ток реактора (КЗ типа 1):

a — $L_d k_{тр} = 400$ мГн (однофазный ИРМ); $б$ — $L_d k_{тр} = 3500$ мГн (КЗ типа 1, однофазный ИРМ); $в$ — $L_d k_{тр} = 3500$ мГн (трехфазное КЗ); $г$ — $L_d k_{тр} = 400$ мГн (трехфазное КЗ)

выбраны индуктивности реактора $L_d k_{тр} = 3,5$ Гн для КЗ типа 1. Ток реактора для этого случая при КЗ типа 1 представлен на рис. 2, б.

После окончания переходного процесса ток линии протекает через первичную обмотку трансформатора, основная гармоника этого тока блокируется фильтром. Ток линии (рис 3, а) при этом определяется добротностью контура $L_\phi C_\phi$.

Значения измеренных на модели параметров для однофазного ИРМ приведены в табл. 1—3. Указаны максимальные значения при переходном процессе.

Приведенные данные позволяют заключить следующее:

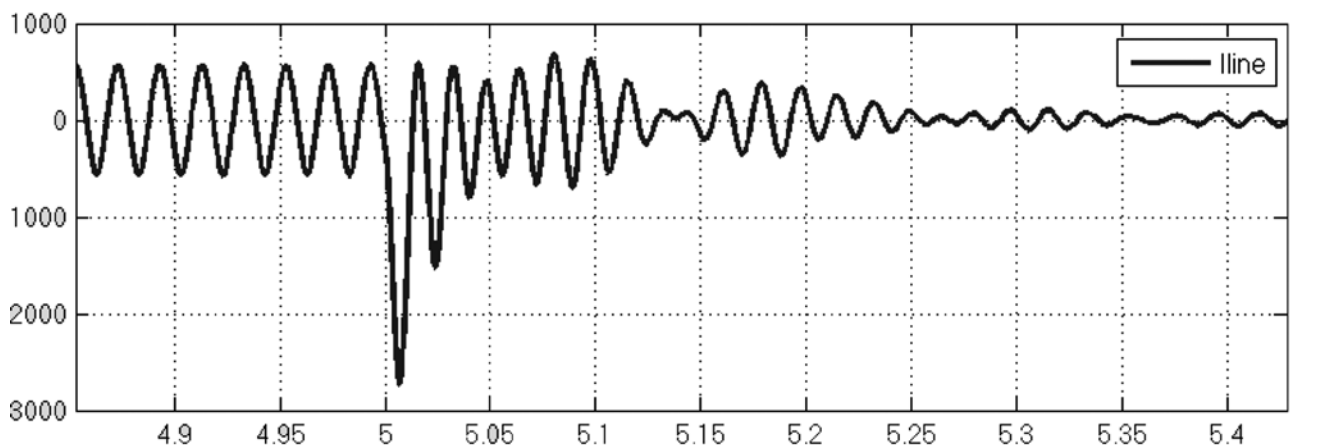
при малых значениях $L_d k_{тр}$ максимальный ток тиристора IVT имеет наибольшее значение при КЗ типа 2, в других случаях значение тока ограничивается влиянием сопротивления линии;

при увеличении $L_d k_{тр}$ значения максимального тока тиристора I_{VT} при различных типа КЗ снижаются и меньше различаются друг от друга.

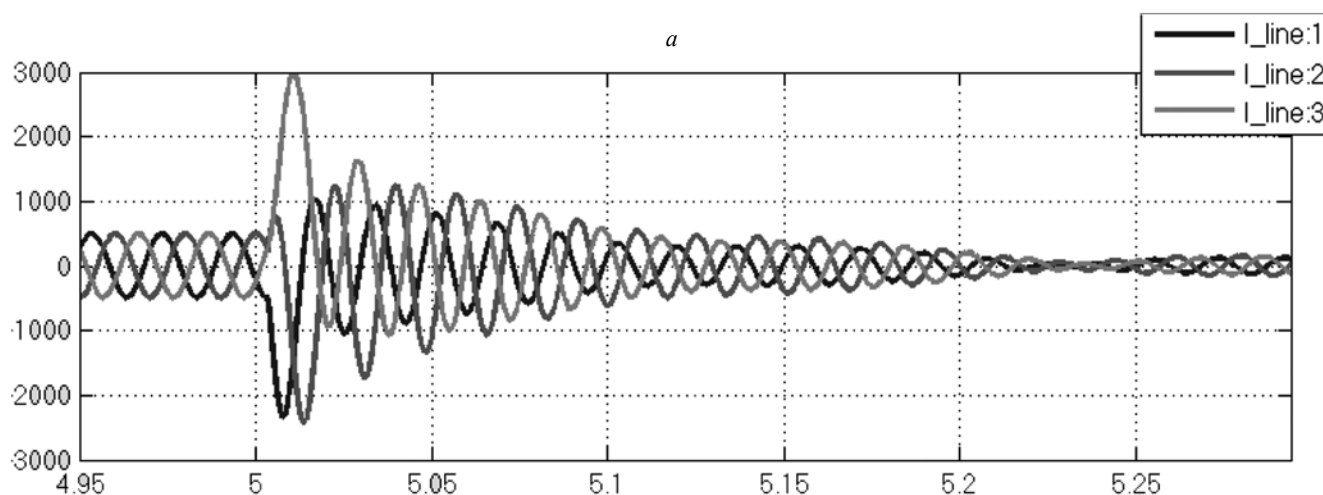
Моделирование трехфазного ИРМ

В трехфазном ИРМ рассматриваются те же возможные места возникновения КЗ, что и в однофазном. Для каждого из случаев необходимо исследовать КЗ одной и всех трех фаз на землю, а также междуфазные КЗ. Короткое замыкание одной фазы чревато возникновением несимметричного режима работы.

Использование в ИРМ трехфазных трансформаторов имеет преимущества с точки зрения массогабаритных и стоимостных показателей. Однако с точки зрения аварийных процессов, из-за наличия общего магнитопровода они обнаруживают свой главный недостаток – взаимное влияние фаз. Это означает, что короткое замыкание одной из фаз на землю повлечет за собой аварийные процессы и в остальных фазах, что отрицательно сказывается на режиме энергосистемы и усложняет алгоритмы работы релейной защиты. В связи с этим рассматривается вариант трехфазного ИРМ с тремя однофазными трансформаторами.



а



б

Рис. 3. Ток линии при КЗ типа 1:
а — $L_d k_{тр} = 3500$ мГн (однофазный ИРМ); б — $L_d k_{тр} = 400$ мГн (трехфазное КЗ)

Таблица 1

КЗ типа 1

$L_d, \text{Гн}$	$I_{VT}, \text{А}$	$I_\phi, \text{А}$	$U_\phi, \text{кВ}$	$I_{\text{лин}}, \text{А}$	$I_{e1}, \text{кА}$	$I_L, \text{А}$
0,4	1720	1854	381	2812	115	1733
2	900	2168	381	2750	115	930
3,5	680	2201	381	2727	115	712

Обозначения: I_{VT} — амплитуда тока работающей пары тиристорov; I_ϕ — амплитуда тока ветви фильтра; U_ϕ — амплитуда напряжения на ветви фильтра; I_{e1} — амплитуда тока источника e_1 ; I_L — амплитуда тока реактора L_d .

Таблица 2

КЗ типа 2

$L_d, \text{Гн}$	$I_{VT}, \text{А}$	$I_\phi, \text{А}$	$U_\phi, \text{кВ}$	$I_{\text{лин}}, \text{А}$	$I_{e1}, \text{кА}$	$I_L, \text{А}$
0,4	4467	111	426	3311	14,3	4493
2	1253	112	440	3308	11,9	1267
3,5	898	116	440	3304	11,7	904

Таблица 3

КЗ типа 3

$L_d, \text{Гн}$	$I_{VT}, \text{А}$	$I_\phi, \text{А}$	$U_\phi, \text{кВ}$	$I_{\text{лин}}, \text{А}$	$I_{e1}, \text{кА}$	$I_L, \text{А}$
0,4	2571	3149	325	6610	4382	2594
2	934	3595	421	6605	4249	958
3,5	731	3633	424	6600	4206	767

При работе трехфазного ИРМ в любой момент времени токи протекают только в двух фазах. В связи с этим значительно различаются протекания электромагнитных процессов в двух случаях однофазного короткого замыкания.

Замыкание протекает в одной из фаз, по которой протекает ток ИРМ. В этом случае к реактору прикладывается линейное напряжение, в котором преобладает фазовое напряжение короткозамкнутой фазы. Процессы в значительной мере подобны процессам в однофазном ИРМ. Ток сети обоих проводящих фаз изменяется одинаково. Вероятность КЗ по этому варианту 2/3.

Замыкание происходит в фазе, ток которой не протекает через тиристоры ИРМ. В этом случае ток через реактор L_d спадает от значения I_0 . Ток короткозамкнутой фазы ограничен сопротивлением контура $L_\phi C_\phi$ на сетевой частоте. Вероятность КЗ по этому варианту 1/3.

Результаты моделирования представлены в табл. 4—6 для однофазного КЗ, и в таблицах 7—9 для трехфазного.

При трехфазном КЗ наихудший режим возникает, если в момент короткого замыкания начинается полуволна одного из линейных напряжений. К реактору прикладывается линейное напряжение, как в случае КЗ на землю, так и при междуфазном КЗ. Вследствие этого токи тиристорov и ток в линии в наихудшем режиме будут больше, чем при однофазном коротком замыкании.

На рисунке 3, а представлена диаграмма тока реактора при трехфазном КЗ типа 1.

Проведенный анализ показал, что при возникновении двойных однофазных КЗ на землю токи в ИРМ не могут превышать значений, приведенных в рассмотренных выше режимах.

Выводы

Исследование последовательных ИРМ на предмет работы в аварийных режимах показало, что устройство за счет наличия в составе реактора позволяет ограничивать во всех режимах аварийные токи, протекающие в полупроводниковых вентилях. Ток линии ограничивается в случае КЗ между местом установки ИРМ и источником e_1 и в случае КЗ источника e_2 , а также при КЗ на протяжении ЛЭП на участке с включенным ИРМ.

Наибольшая амплитуда токов через тиристоры наблюдается в наихудшем режиме при приложении к реактору в момент короткого замыкания начала положительной полуволны напряжения.

Наибольшие токи в наихудшем режиме при одинаковых значениях L_d протекают при трехфазном коротком замыкании в системе с трехфазным ИРМ как при КЗ на землю, так и при междуфазном КЗ. В однофазных ИРМ при трехфазном и однофазном КЗ максимальные токи одинаковы и меньше по величине. Ука-

Таблица 4

КЗ типа 1

L_d , Гн	I_{VT} , А	I_ϕ , А	U_ϕ , кВ	$I_{\text{лнн}}$, А	I_{el} , кА	I_L , А
0,4	920	1693	445	2342	90	932
2	564	1821	451	2326	90	575
3,5	710	1763	418	2318	90	765

Таблица 5

КЗ типа 2

L_d , Гн	I_{VT} , А	I_ϕ , А	U_ϕ , кВ	$I_{\text{лнн}}$, А	I_{el} , кА	I_L , А
0,4	3304	16,7	476	2405	17,8	3481
2	947	16,9	486	2405	17,6	1121
3,5	682	16,9	487	2405	17,5	837

Таблица 6

КЗ типа 3

L_d , Гн	I_{VT} , А	I_ϕ , А	U_ϕ , кВ	$I_{\text{лнн}}$, А	I_{el} , кА	I_L , А
0,4	1424	3018	445	5010	3812	1453
2	673	3235	470	5013	3778	705
3,5	721	3249	462	5010	3763	804

Таблица 7

КЗ типа 1

L_d , Гн	I_{VT} , А	I_ϕ , А	U_ϕ , кВ	$I_{\text{лнн}}$, А	I_{el} , кА	I_L , А
0,4	1720	2410	475	2430	116	1734
2	788	2398	470	2416	116	805
3,5	817	2389	470	2408	116	872

Таблица 8

КЗ типа 2

L_d , Гн	I_{VT} , А	I_ϕ , А	U_ϕ , кВ	$I_{\text{лнн}}$, А	I_{el} , кА	I_L , А
0,4	6412	16,6	502	3390	20,6	6615
2	1683	16,8	496	3385	17,7	1794
3,5	1187	16,8	495	3380	17,6	1224

Таблица 9

КЗ типа 3

L_d , Гн	I_{VT} , А	I_ϕ , А	U_ϕ , кВ	$I_{\text{лнн}}$, А	I_{el} , кА	I_L , А
0,4	2810	4030	470	6709	4822	2874
2	1031	4007	468	6707	4581	1098
3,5	765	3994	467	6703	4545	832

занное обстоятельство определяет преимущества при применении однофазных ИРМ.

Выбор индуктивности L_d проводится из условия ограничения предельных токов тиристорov в режиме КЗ на заданном уровне. Приведенные в статье данные позволяют выбрать L_d , причем расчет необходимо проводить для КЗ типа 2, а для трехфазных ИРМ для трехфазного короткого замыкания.

Литература

1. **Чаплыгин Е.Е., Асташев М.Г., Расули К.В.** Применение активных источников реактивной мощ-

ности для перераспределения потоков энергии в электрических сетях // *Электротехника*. 2013. № 12. С. 19—24.

2. **Лабунцов В.А., Чаплыгин Е.Е.** Компенсаторы неактивной мощности на вентилях с естественной коммутацией // *Электричество*. 1996. № 9. С. 55—59.

3. **Чаплыгин Е.Е., Ковырзина О.С.** Компенсация неактивных составляющих полной мощности дуговых сталеплавильных печей // *Электричество*. 2009. № 11. С. 30—38.

Статья поступила в редакцию 27.01.2016