

Электротепловые переходные процессы в сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором с функцией токоограничения

МАНУСОВ В.З., ИВАНОВ Д.М.

НГТУ, Новосибирск, Россия

Представлены результаты исследования тепловых и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим (ВТСП) трансформатором с функцией токоограничения. Для исследований разработан экспериментальный образец ВТСП-трансформатора с обмотками из сверхпроводника $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ и диэлектрической средой в виде жидкого азота с рабочей температурой 77 К. На примере экспериментального образца доказано, что трансформаторы с ВТСП-обмотками возможно применять для ограничения токов короткого замыкания в электрических системах. Разработанная математическая модель трехфазной одномашиной сети с ВТСП-трансформатором позволила провести глубокий анализ электромагнитных переходных процессов в режиме токоограничения, а также исследовать тепловое и электродинамическое воздействия тока короткого замыкания при варьировании его вида (однофазное, двухфазное и трехфазное короткое замыкание) и типа подключенной нагрузки (активная, активно-индуктивная, активно-емкостная) на степень токоограничения. Установлено, что в момент токоограничения возникают существенные тепловые потоки, которое также необходимо ограничивать. Показано положительное влияние ВТСП-трансформаторов на рабочие режимы электроэнергетической системы. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований доказывают высокую эффективность их токоограничивающей функции.

Ключевые слова: ВТСП-трансформатор, высокотемпературная сверхпроводимость, ограничение токов короткого замыкания, энергоэффективность, жидкий азот

Рост нагрузок потребителей, мощности генерирующих объектов и развитие электросетевого комплекса создают проблему ограничения токов короткого замыкания (КЗ) в электрических сетях классов напряжений 35–220 кВ. Тенденция повышения токов КЗ в электрических сетях оказывает существенное влияние на выбор защитно-коммутационной аппаратуры и надежность функционирования электросетевого, подстанционного и станционного высоковольтного электрооборудования. Со временем уровни расчётных токов КЗ возрастают и могут превысить отключающую способность выключателей на электрических станциях и подстанциях.

Благодаря уникальным свойствам ВТСП-материалов, создаются быстродействующие сверхпроводящие токоограничители, которые позволяют ограничивать сверхвысокие ударные токи КЗ практически мгновенно. Использование сверхпроводников позволит решить задачу ограничения токов КЗ в электроэнергетических системах при минимальном влиянии токоограничителей на режимы работы электрических сетей и смежного оборудования. В связи с этим конструирование и исследование сверхпроводящих токоограничивающих устройств, в частности силовых ВТСП-трансформаторов с функцией токоограничения, являются одним из

наиболее перспективных направлений развития электроэнергетики.

ВТСП-трансформаторы обладают рядом преимуществ перед классическими трансформаторами:

- снижение на 90–95% потерь в обмотках трансформатора;
- функция ограничения токов короткого замыкания;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- снижение массогабаритных характеристик на 60%;
- повышенный КПД (до 99,8%).

Конструирование и исследование трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками вызывают большой интерес и описываются в работах ученых ведущих мировых институтов [1–3]. Предпринимаются попытки оптимизировать конструктивное исполнение и технические характеристики ВТСП-трансформаторов с точки зрения энергоэффективности, энергосбережения и снижения массогабаритных показателей [4–6]. В [7] собраны и проанализированы результаты работы многих команд конструкторов и исследователей, суммарно на счету которых 20 созданных ВТСП-трансформаторов в диапазоне мощностей от 25 до 5000 кВ·А. Однако следует отметить, что, несмотря на огромный интерес научной общественности к ВТСП-трансформаторам, еще не определены до-

статочны точные методы и принципы конструирования этих электрических машин. Именно поэтому для оценки безопасности применения ВТСП-трансформаторов требуется исследовать электродинамические и тепловые воздействия тока при различных режимах работы электрической сети. Необходимо провести анализ всех факторов, влияющих на токоограничивающую функцию ВТСП-трансформатора и перехода сверхпроводника в резистивное состояние и обратно.

ВТСП-трансформаторы с функцией токоограничения. Процесс токоограничения достигается благодаря уникальному свойству ВТСП-проводов терять сверхпроводящие свойства при превышении током некоторого критического значения, поэтому для достижения токоограничивающих свойств необязательно создавать специализированные устройства, но целесообразно включить этот эффект в уже известные и широко используемые трансформаторы, электрические машины, кабели [8–10].

В пользу применения эффекта токоограничения непосредственно в трансформаторах говорит их уязвимость к температурным и динамическим воздействиям токов КЗ [11]. Ограничение тока КЗ с помощью сверхпроводящего трансформатора может оказаться наиболее важным преимуществом замены медных обмоток на сверхпроводящие.

Первый пик тока КЗ (ударный ток) (рис. 1) вызывает динамические силы, которые могут разрушить обмотку трансформатора в течение половины периода длительности тока КЗ [11, 12]. С другой стороны, длительное протекание установившегося тока КЗ через обмотку может вызвать ее перегрев. Поэтому важно ограничить бросок тока менее чем за половину периода переменного тока. Хорошо известны защитные средства против термического перегрева, но невозможно ограничить первый пик броска тока с помощью традиционных ограничителей.

ВТСП-ленты второго поколения позволяют создать трансформатор с высокой стойкостью к короткому замыканию. Соответствующая конструкция сверхпроводящего устройства может уменьшить ударный ток КЗ за время, равное четверти периода переменного тока. Это позволит защитить трансформатор от разруши-

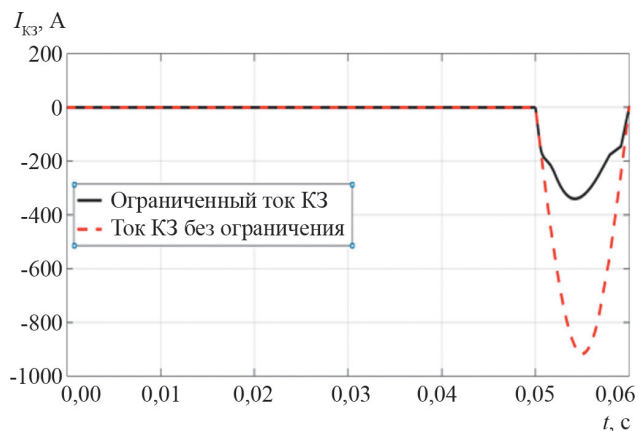


Рис. 1. Ограничение ударного тока короткого замыкания

Fig. 1. Limiting of the short-circuit surge current

тельных динамических сил, обеспечить дополнительную защиту и значительно снизить износ выключателей и другого силового оборудования [13–17].

Описание моделируемой экспериментальной установки. Для адекватной оценки влияния ВТСП-трансформаторов на режимы работы электроэнергетической системы необходимо изучить электродинамические и тепловые процессы в электрической сети. Важной задачей является исследование параметров, влияющих на переход сверхпроводников второго поколения в резистивное состояние и обратно. Для решения этой задачи выбрана электродинамическая модель, находящаяся в Центре испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем на базе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Модель данной системы при включении в нее ВТСП-трансформатора позволяет с достаточной точностью анализировать электродинамические переходные процессы, происходящие в сети при КЗ. В будущем планируется провести серию натурных экспериментов на электродинамической модели с ВТСП-трансформатором для оценки его влияния на статическую и динамическую устойчивость энергосистемы. Схема замещения моделируемой трехфазной сети представлена на рис. 2.

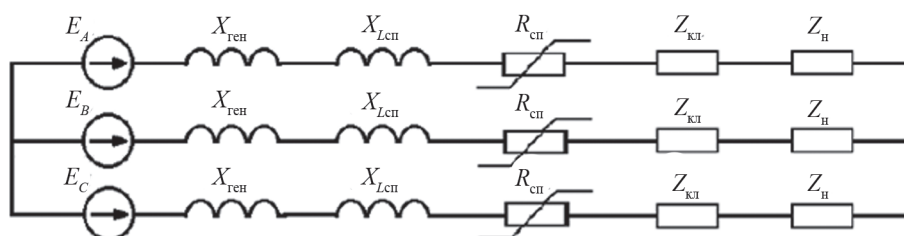


Рис. 2. Схема замещения моделируемой трехфазной сети: E_A – фазное напряжение; $X_{ген}$ – индуктивное сопротивление генератора; $X_{Лсп}$, $R_{сп}$ – индуктивное и активное сопротивления ВТСП-трансформатора; $Z_{кл}$, $Z_{н}$ – полные сопротивления кабельной линии и нагрузки

Fig. 2. Replacement scheme of the simulated three-phase network: E_A is a phase voltage; $X_{ген}$ is a generator reactance; $X_{Лсп}$ is the HTSP-transformer reactance; $R_{сп}$ is the HTSP-transformer resistance; $Z_{кл}$ and $Z_{н}$ are impedances of the cable line and load

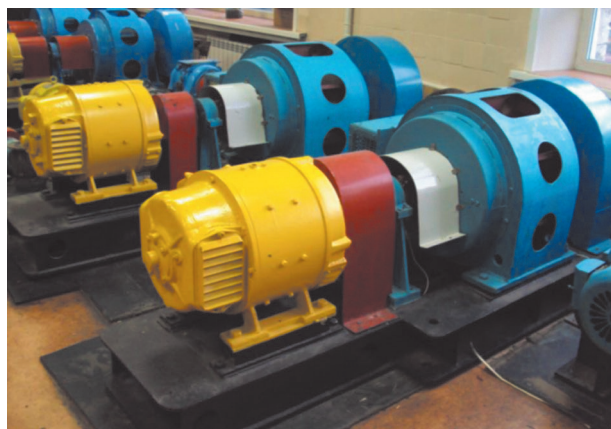


Рис. 3. Синхронный генератор типа MCA 72/4A

Fig. 3. MCA 72/4A synchronous generator

Таблица 1

Параметры моделируемого синхронного генератора типа MCA 72/4A
Parameters of the simulated synchronous generator of the MCA 72/4A type

Параметр	Значение
Полная мощность S_{H^*} , кВ·А	15
Активная мощность P_{H^*} , кВт	12
Номинальный ток I_{H^*} , А	23,6
Номинальное напряжение U_{H^*} , В	380
Номинальный cosφ	0,8
Номинальные обороты n , об/мин	1500
Реактивное сопротивление x_s , отн.ед.	0,055
Синхронное реактивное сопротивление по оси «d» x_d , отн.ед.	0,583
Переходное сопротивление по оси «d» x'_d , отн.ед.	0,134
Сверхпереходное сопротивление по оси «d» x''_d , отн.ед.	0,0665
Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора T_{d0} , с	0,947



Рис. 4. Трехфазный экспериментальный образец ВТСП-трансформатора

Fig. 4. Three-phase prototype of a HTS-transformer

В состав моделируемого объекта входит синхронный генератор типа MCA 72/4A (рис.3). Электрическая машина общепромышленного назначения номинальной мощностью 15 кВ·А используется для проведения натуральных экспериментов переходных электромагнитных процессов с учетом критериев подобия. В качестве приводного двигателя используются машины постоянного тока типа П-62 мощностью 14 кВт. Основные параметры синхронного генератора приведены в табл. 1.

Основным исследуемым объектом является созданный на базе кафедры «Системы электроснабжения предприятий» НГТУ экспериментальный образец трансформатора с ВТСП-обмотками (рис.4). Параметры разработанного ВТСП-трансформатора мощностью 63 кВ·А с соотношением напряжений 380/127 В представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры ВТСП-трансформатора
Parameters of the HTS-transformer

Параметр	Значение	
Мощность, кВ·А	63	
Количество фаз	3	
Схема соединения обмоток	Y-Y	
Соотношение напряжений, В	380/127	
Частота, Гц	50	
Ток ХХ, %	6	
$U_{кз}$, %	1	
Параметры обмоток ВН и НН		
Параметр	Обмотка ВН	Обмотка НН
Материал	YBCO	
Ширина ВТСП ленты, мм	4	12
Критический ток минимальный, А	131	439
Напряжение линейное, В	380	127
Номинальный ток, А	95,7	287,2
Количество витков	33	11
Длина одной фазы обмотки, м	28,1	8,4
Длина трех фаз обмотки, м	84,3	25,2
Высота обмотки, мм	198	154
Диаметр обмотки, мм	271	243
Изоляция	Полиимид	
Параметры магнитопровода		
Материал	Электротехническая сталь	
Толщина листа, мм	0,3	
Изоляция	Лаковая изоляция	
Масса стали, кг	410	
Коэффициент заполнения	0,833	

Линия электропередачи – кабельная линия с параметрами: $R_0 = 3$ Ом/км, $X_0 = 0,044$ Ом/км. В составе электродинамической модели имеется три вида нагрузки: активная, активно-индуктивная и активно-емкостная.

Модель электротепловых переходных процессов в трехфазной одномашинной сети с ВТСП-трансформатором. Для корректного математического описания ВТСП-трансформатора в режиме токоограничения составлена математическая модель изменения тока и напряжения в ВТСП-обмотках трансформатора, которая позволяет адекватно рассчитывать переходный электромагнитный процесс в сети. Поскольку одной из основных задач является исследование электротепловых процессов в сети с ВТСП-трансформатором в режиме токоограничения, приняты следующие допущения: отсутствие насыщения магнитопровода; нулевые магнитные потери.

Для обмоток трансформатора использовались ВТСП-ленты второго поколения $Y_1Ba_2Cu_3O_7$, поэтому необходимо рассматривать обмотки трансформатора как сверхпроводник, переходящий сначала в промежуточное смешанное состояние, а затем в резистивное. Переход осуществляется при превышении одного из критических параметров сверхпроводника: температуры, магнитной индукции, тока. Стоит отметить, что при потере сверхпроводимости в режиме токоограничения ток протекает не только по сверхпроводнику, но и по несверхпроводящим слоям обмотки (рис.5) [18, 19].

Для описания активного сопротивления сверхпроводящего слоя принято использовать следующее выражение, принимая допущение о том, что свойства ВТСП-провода одинаковы по всей его длине [18]:

$$R_{ВТСП}(I, T) = \frac{10^{-6}}{I} \left(\frac{I}{I_K(T)} \right)^n, \quad (1)$$

где I – ток, протекающий по сверхпроводнику; n – показатель степени ВАХ сверхпроводящей ленты, принимается равным 15; $I_K(T)$ – критический ток сверхпроводника (при превышении критической температуры сверхпроводника (93 К) в модели принимается равным 0).

Критический ток в свою очередь представляется в виде [19]:

$$I_K(T) = -\frac{I_{K0}}{0,1848} \ln\left(\frac{T}{93}\right), \quad (2)$$

где I_{K0} – критический ток при температуре 77 К, зависит от параметров сверхпроводника.

Активное сопротивление несверхпроводящих слоев:

$$R_{НС}(T) = \frac{1}{\frac{1}{R_{CU}(T)} + \frac{1}{R_{AG}(T)} + \frac{1}{R_{БС}(T)} + \frac{1}{R_{Хаст}(T)}}, \quad (3)$$

где R_{CU} – сопротивление слоя меди; R_{AG} – сопротивление слоя серебра; $R_{БС}$ – сопротивление буферного слоя; $R_{Хаст}$ – сопротивление слоя хастелля.

Эквивалентное активное сопротивление всего провода для трех состояний (рис. 5) определяется как:

$$R_{\Sigma}(I, T) = \frac{R_{НС}(T) R_{ВТСП}(I, T)}{R_{НС}(T) + R_{ВТСП}(I, T)}. \quad (4)$$

Важнейшим условием нормальной работы ВТСП-трансформатора в режиме токоограничения является переход сверхпроводника в сверхпроводящее состояние после КЗ. Для математического описания этого процесса необходимо учитывать нагрев сверхпроводящей обмотки. Составим уравнение теплового баланса для определения изменения температуры сверхпроводящей обмотки в момент ограничения тока КЗ. В качестве допущения принимаем, что температура по всему объему обмотки распределяется равномерно:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q(I, R_{\Sigma}) - Aq(\Delta T)}{C_{\Sigma}(T)}, \quad (5)$$

где Q – количество теплоты, выделяющееся на обмотке; A – площадь поверхности охлаждения ВТСП-обмотки; $C_{\Sigma}(T)$ – суммарная теплоёмкость ВТСП-обмотки; $q(\Delta T)$ – плотность теплового потока (рис. 6).

Плотность теплового потока q имеет сложную зависимость от разницы температур между охлаждаемой

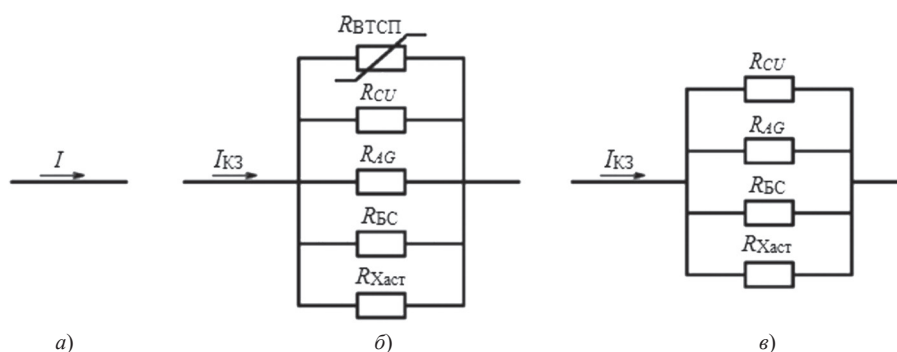


Рис. 5. Схема замещения ВТСП-ленты: а – сверхпроводящее состояние; б – смешанное состояние; в – резистивное состояние

Fig. 5. Equivalent circuit of HTS-tape: а – superconducting state; б – mixed state; в – resistive state

поверхностью и жидким азотом, которая представлена на рис. 6. При значительном перегреве сверхпроводящей обмотки (при $\Delta T > 30$ система перейдет в режим пленочного кипения) отвод тепла от неё будет происходить неэффективно, что будет обуславливать дальнейший перегрев вплоть до разрушения ВТСП-провода. Поэтому для стабильной работы ВТСП-трансформатора в режиме токоограничения важно не допускать перегрев обмоток свыше температуры кризиса кипения (≈ 107 К) [20–22].

Используя схему замещения эксперимента (рис. 7), составим уравнение моделируемой цепи:

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = (L_\Gamma + L_{\text{ВТСП}} + L_{\text{КЛ}}) \frac{di(t)}{dt} + i(t)(R_{\text{КЛ}} + R_\Sigma(i, T)), \quad (6)$$

где L_Γ – индуктивность генератора; $L_{\text{ВТСП}}$ – индуктивность ВТСП-трансформатора; $L_{\text{КЛ}}$ – индуктивность кабельной линии; $R_\Sigma(i, T)$ – эквивалентное сопротивление ВТСП-ленты для трех состояний; $R_{\text{КЛ}}$ – активное сопротивление кабельной линии; i – ток в цепи; U_m – амплитуда напряжения генератора В; ω – циклическая частота; t – время.

Численное решение дифференциальных уравнений (5) и (6) в программном комплексе (ПК) *MATLAB/Simulink* для известных параметров эксперимента, представленных в предыдущих разделах, позволяет получить модель электромагнитных и тепловых переходных процессов в трехфазной одномашинной сети с ВТСП-трансформатором в режиме токоограничения.

Анализ электротепловых переходных процессов в трехфазной одномашинной системе с ВТСП-трансформатором. В ПК *MATLAB/Simulink* реализована математическая модель трехфазной одномашинной сети с верифицированной натурными экспериментами моделью ВТСП-трансформатора. Для верификации математической модели были проведены экспериментальные исследования, которые включали определение характеристик переходных процессов при КЗ для проверки способности сверхпроводящей обмотки ограничивать ток КЗ [18, 19, 23].

Для анализа переходных процессов в момент токоограничения в одномашинной трехфазной сети с ВТСП-трансформатором было проведено моделирование трех видов КЗ (трехфазное, двухфазное и однофазное на землю). Моделирование проводилось для сети с активной, активно-индуктивной и активно-емкостной типами нагрузки. В ходе исследования были сняты зависимости тока КЗ от времени, а также показатели температуры сверхпроводника при исследуемом режиме работы сети. Длительность КЗ составила 0,6 с.

Рассмотрим наиболее тяжелый режим работы сети, а именно трехфазное КЗ в одномашинной системе с ВТСП-трансформатором, работающим на активно-емкостную нагрузку. Проанализировав полученные в результате численного моделирования осциллограммы

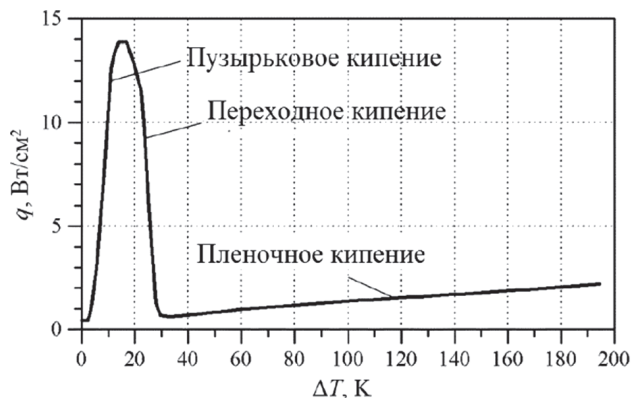


Рис. 6. Плотность теплового потока в зависимости от разницы температур между охлаждаемой поверхностью и охлаждающей жидкостью

Fig. 6. Dependence of the heat flux density on the temperature difference between the cooled surface and the cooling liquid

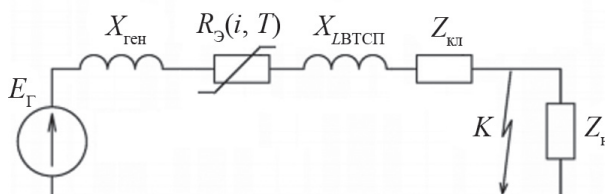


Рис. 7. Схема замещения эксперимента

Fig. 7. Equivalent circuit of the experiment

(рис. 8 и 9), резюмируем ограничение ударного тока КЗ в 2,83 раза. Отметим, что при переходном процессе температура сверхпроводящей обмотки не превысила температуру кризиса кипения жидкого азота (≈ 107 К), что обеспечило дальнейший возврат обмотки в сверхпроводящее состояние и стабильную работу ВТСП-трансформатора и всей сети.

В режиме токоограничения при протекании тока через несверхпроводящие слои обмотки образуются обильные джоулевы потери, которые провоцируют резкий рост температуры обмотки, способный привести к его разрушению. Численное решение уравнений (1)–(6) в ПК *MATLAB/Simulink* позволяет проанализировать температуру нагрева сверхпроводящих обмоток. На рис. 10 представлена полученная в результате численного моделирования зависимость температуры обмоток ВТСП-трансформатора от времени для трехфазного КЗ при активно-емкостной нагрузке.

На осциллограмме (рис. 10) видно, что температура перегрева не превысила температуру кризиса кипения (система не перешла в состояние пленочного кипения) и сверхпроводник после прохождения через него тока, превышающего критический, вернулся в сверхпроводящее состояние, тем самым не потеряв своих свойств.

Для надежного функционирования ВТСП-трансформаторов в реальной энергосистеме необходимо обеспечить беспрепятственный возврат обмотки трансформатора в сверхпроводящее состояние после

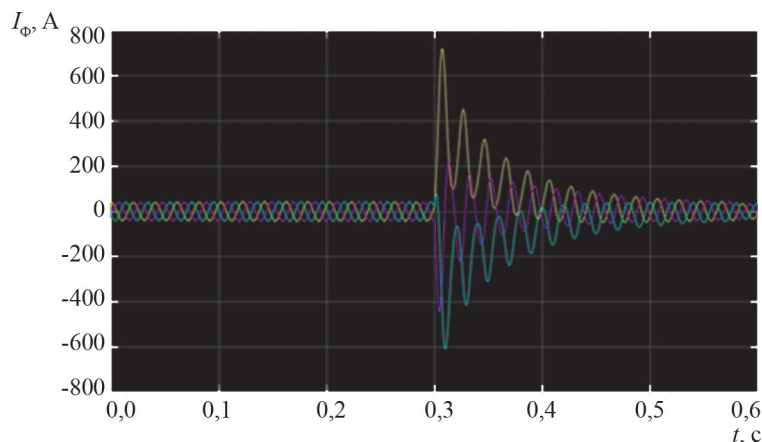


Рис. 8. Осциллограмма тока в обмотках при трехфазном КЗ при активно-емкостной нагрузке в сети без ВТСП-трансформатора
Fig. 8. Waveform of the current in a system without HTS-transformer with a three-phase short-circuit with an active-capacitive load

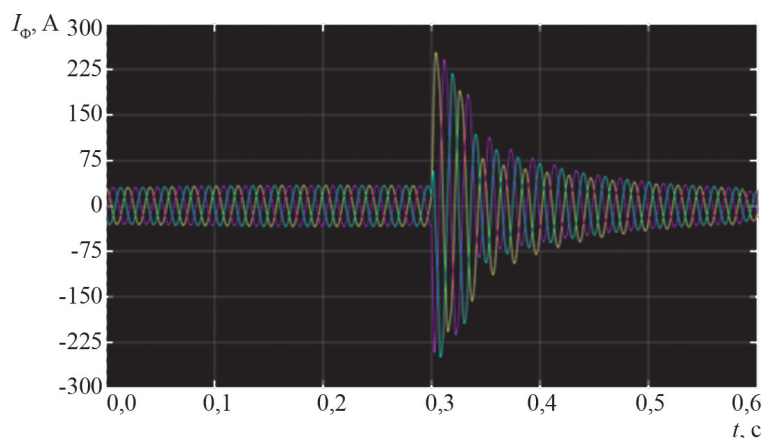


Рис. 9. Осциллограмма тока в обмотках при трехфазном КЗ при активно-емкостной нагрузке в сети с ВТСП-трансформатором
Fig. 9. Waveform of the current in a system with HTS-transformer with a three-phase short-circuit with an active-capacitive load

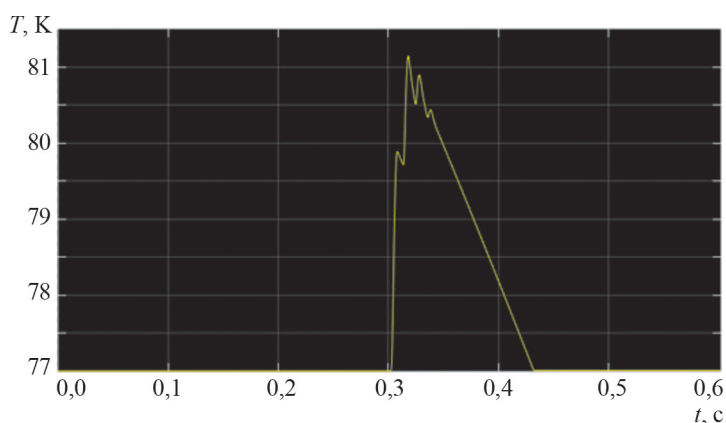


Рис. 10. Зависимость температуры ВТСП-обмоток от времени при трехфазном КЗ
Fig. 10. Dependence of the temperature of the HTS windings on time at the three-phase short circuit

процесса токоограничения, например после цикла АПВ. Для эффективного охлаждения обмотки важно не допустить перехода системы в режим пленочного кипения (температура перегрева обмоток не должна превышать ≈ 107 К) (рис. 6), что приведет к перегреву обмоток и возможному разрушению сверхпроводящих лент [23–25]. Теплоемкость обмоток и охлаждающей

жидкости должна быть рассчитана для восприятия выделяющегося тепла, а длительность КЗ должна быть ограничена. Обратим внимание, что при тепловом срыве сверхпроводящих обмоток требуется немедленное отключение ВТСП-трансформатора для его охлаждения, что приведет к перерыву в электроснабжении потребителей [26–28].

Таблица 3

Значения токов и температур при разных режимах КЗ в сети
Values of currents and temperatures for different modes of short-circuit in the grid

Тип нагрузки	Вид КЗ	Ток КЗ без ВТСП, А	Ток КЗ с ВТСП, А	Температура, К
Активная	Трёхфазное	705	250,6	80,9
	Двухфазное	576	240	79
	Однофазное на землю	101	99	77
Активно-индуктивная	Трёхфазное	710	251	81,1
	Двухфазное	580	249	78,7
	Однофазное на землю	103	100	77
Активно-емкостная	Трёхфазное	726	255	81,3
	Двухфазное	579	248	79
	Однофазное на землю	103	100	77

Значения токов, протекающих в сети при разных режимах КЗ и нагрузок, а также значений температуры ВТСП-обмоток, представлены в табл. 3.

Анализируя полученные результаты, резюмируем, что ограниченный ток при различных режимах работы сети достигает практически одинаковых значений 240–255 А. Это свидетельствует о том, что эффект токоограничения не зависит от вида КЗ в сети и типа нагрузки, подключенной к ВТСП-устройству. Возврат сверхпроводника в сверхпроводящее состояние зависит от длительности КЗ и эффективности системы охлаждения ВТСП-трансформатора. На сам показатель токоограничения влияет отношение тока КЗ до ограничения к критическому значению тока сверхпроводника, что было доказано в [19].

Выводы. Проведенные исследования показали, что степень токоограничения не зависит от типа нагрузки, подключенной к ВТСП-устройству, и вида КЗ. На успешный возврат сверхпроводника в сверхпроводящее состояние влияют длительность КЗ и эффективность системы охлаждения ВТСП-трансформатора. Зафиксировано снижение ударного тока КЗ в 2,83 раза при трехфазном КЗ в сети, работающей на активно-емкостную нагрузку, что доказывает реальность использования ВТСП-трансформаторов с целью токоограничения.

Сверхпроводящие трансформаторы, благодаря уникальному свойству токоограничения, способны оказывать положительный эффект на всё смежное оборудование, не внося при этом в сеть дополнительное реактивное сопротивление, как в случае с токоограничивающими реакторами. Применение ВТСП-трансформаторов позволит решить проблемы ограничения токов КЗ и повышения энергоэффективности электрических сетей в краткосрочной перспективе. Полученные новые научные результаты показывают целесообразность дальнейшего продолжения исследований в этом направлении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект № С21-24.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hellmann S., et al.** Manufacturing of a 1-MVA-Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer With Recovery-Under-Load Capabilities. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, pp. 1–6, DOI:10.1109/TASC.2017.2652493.
2. **Elsherif M.A.** The Application of Superconducting Technologies in Future Electrical Power Systems: Durham E-Theses. Durham University, 2013, 193 p.
3. **Hekmati A., et al.** HTS Transformer Windings Design Using Distributive Ratios for Minimization of Short Circuit Forces. – J Superconductivity Novel Magnetism, 2019, vol. 32, No. 2, pp. 151–158.
4. **Vysotsky V.S., et al.** Development and Test Results of HTS Windings for Superconducting Transformer with 1 MVA Rated Power. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, pp. 1–5.
5. **Dai S., et al.** Development of a 1250 kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 26, No. 1, pp. 1–7.
6. **Hu D., et al.** Development of a Single-Phase 330kVA HTS Transformer Using GdBCO Tapes. – Physica C: Superconductivity and its applications, 2017, vol. 539, DOI:10.1016/j.physc.2017.06.002.
7. **Манусов В.З., Крюков Д.О.** Обзор конструкций трансформаторов со сверхпроводящими обмотками. – Электричество, 2019, № 8, с. 4–6.
8. **Komarzyniec G.** 14 kVA Superconducting Transformer with REBCO Windings. – 2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors, 2017, DOI:10.1109/ELMECO.2017.8267753.
9. **Berger A., et al.** Test Results of 60 kVA Current Limiting Transformer with Full Recovery under Load. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1384–1387.
10. **Xu M., et al.** Generalized Critical-State Model for Hard Superconductors. – Phys. Rev. B, 1990, vol. 42, No. 16, pp. 10773–10776.
11. **Algarni R., et al.** Enhanced Critical Current Density and Flux Pinning Traits with Dy₂O₃ Nanoparticles Added to YBa₂Cu₃O_{7- δ} Superconductor. – Journal of Alloys and Compounds, 2021, vol. 852, p. 157019.
12. **Song W., et al.** AC Loss Simulation in a HTS 3-Phase 1 MVA Transformer Using H Formulation. – Cryogenics, 2018, vol. 94, pp. 14–21.
13. **Ghabeli A., et al.** Optimization of Distributive Ratios of Apportioned Winding Configuration in HTS Power Transformers for Hysteresis Loss and Leakage Flux Reduction. – Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, vol. 28, No. 12, pp. 3463–3479.
14. **Zubko V.V., Fetisov S.S. and Vysotsky V.S.** Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS Cables. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 3, pp. 1–5.

15. **Shen B., et al.** Review of the AC Loss Computation for HTS Using H Formulation. – *Superconductor Science and Technology*, 2020, vol. 33, No. 3, p. 033002.

16. **Berger A., et al.** Comparison of the Efficiency of Superconducting and Conventional Transformers. – *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, vol. 234, p. 032004.

17. **Janowski T., et al.** Superconducting Devices for Power Engineering. – *Proceedings of the XVII National Conference on Superconductivity*, 2016, vol. 130, No. 2, pp. 537–544.

18. **Manusov V.Z., Semenov A.V., Kriukov D.O.** Computational and Experimental Study of Air-Core HTS Transformer Electrothermal Behavior at Current Limiting Mode. – *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2021, vol. 11, No. 1, pp. 155–162.

19. **Ivanov D.M., Manusov V.Z., and Semenov A.V.** Experimental Studies of a High-Temperature Superconducting Prototype Transformer with Current Limiting Function. – *2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE): proc. Moscow, Russia, 2020*, pp. 97–102.

20. **Lei W., et al.** Film Boiling Heat Transfer Prediction of Liquid Nitrogen from Different Geometry Heaters. – *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, vol. 129, p. 103294.

21. **Zhou J., Chan W., Schwartz J.** Quench Detection Criteria for $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Coils Monitored via a Distributed Temperature Sensor for 77 K Cases. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, No. 5, p. 4703012.

22. **Павленко А.Н., Сургаев А.С., Мацех А.М.** Переходные процессы в стекающих пленках жидкости при нестационарном тепловыделении. – *Теплофизика высоких температур*, 2007, Т. 45, № 6, с. 905–916.

23. **Manusov V.Z., Ivanov D.M., Nazarov M.K.** Analyses of Electrical Parameters of Power Transformers with Superconducting Windings. – *20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, 2019, pp. 547–551.

24. **Moradnouri A., et al.** Survey on High-Temperature Superconducting Transformer Windings Design. – *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2020, vol. 33, No. 9, pp. 2581–2599.

25. **Ковалев Л. К. и др.** Зарубежные и русские разработки в области создания сверхпроводниковых электрических машин и устройств. – *Известия РАН. Энергетика*, 2012, № 6, с. 3–26.

26. **Coombs T., et al.** High-Temperature Superconducting (HTS) Transformer-Rectifier Flux Pump for Powering No-Insulation Superconducting Magnet with Low Characteristic Resistance. – *Physica C: Superconductivity and its applications*, 2019, vol. 560, pp. 1–6.

27. **Kondratowicz-Kucewicz B., Wojtasiewicz G.** The Proposal of a Transformer Model With Winding Made of Parallel 2G HTS Tapes With Transpositioners and its Contact Cooling System. – *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, No. 4., p. 5500405.

28. **Wojtasiewicz G.** Fault Current Limitation by 2G HTS Superconducting Transformer-Experimental Investigation. – *Acta Physica Polonica A*, 2016, vol. 130, No. 2, pp. 516–520.

[23.10.2021]



Авторы: Манусов Вадим Зиновьевич – доктор техн. наук, профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия.



Иванов Дмитрий Михайлович – аспирант кафедры «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия.

Elektrichestvo, 2022, No. 1, pp. 9–17

DOI:10.24160/0013-5380-2022-1-9-17

Electrothermal Transients in a Network Containing a High-Temperature Superconducting Transformer with a Current Limiting Function

MANUSOV Vadim Z. (Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia) – *Professor of the Power Supply Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.).*

IVANOV Dmitriy M. (Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia) – *Postgraduate Student of the Power Supply Systems Dept.*

The results of a study of thermal and electromagnetic transients in an electric power system containing a high-temperature superconducting (HTS) transformer with a current limiting function are presented. For carrying out the research work, an experimental HTS transformer sample with windings made of $Y1Ba2Cu3O7$ superconductor and with liquid nitrogen at an operating temperature of 77 K serving as dielectric medium was developed. It has been demonstrated, taking the experimental sample as an example, that transformers with HTS windings can be used to limit short-circuit currents in electrical systems. By using the developed mathematical model of a three-phase single-machine network containing an HTS transformer, it became possible to perform an in-depth analysis of electromagnetic transients in the current limiting mode and to study the thermal and electrodynamic effects produced by the short-circuit current in

varying the short-circuit fault kind (single-phase, two-phase and three-phase short-circuit faults) and the type of connected load (active, active-inductive, and active-capacitive) on the current limiting degree. It has been determined that significant heat flows arise at the current limitation moment, which also should be limited. A positive effect of HTS transformers on the electric power system operating modes is shown. The obtained results of theoretical and experimental studies of HTS transformers prove a high efficiency of their current limiting function.

Key words: HTS transformer, high-temperature superconductivity, short-circuit current limitation, energy efficiency, liquid nitrogen

The research was carried out with financial support as part of the implementation of the NSTU development program, Scientific Project No. C21-24.

REFERENCES

- Hellmann S., et al. Manufacturing of a 1-MVA-Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer With Recovery-Under-Load Capabilities. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, pp. 1–6, DOI:10.1109/TASC.2017.2652493.
- Elsherif M.A. The Application of Superconducting Technologies in Future Electrical Power Systems: Durham E-Theses. Durham University, 2013, 193 p.
- Hekmati A., et al. HTS Transformer Windings Design Using Distributive Ratios for Minimization of Short Circuit Forces. – J Superconductivity Novel Magnetism, 2019, vol. 32, No. 2, pp. 151–158.
- Vysotsky V.S., et al. Development and Test Results of HTS Windings for Superconducting Transformer with 1 MVA Rated Power. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, pp. 1–5.
- Dai S., et al. Development of a 1250 kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 26, No. 1, pp. 1–7.
- Hu D., et al. Development of a Single-Phase 330kVA HTS Transformer Using GdBCO Tapes. – Physica C: Superconductivity and its applications, 2017, vol. 539, DOI:10.1016/j.physc.2017.06.002.
- Manusov V.Z., Kriukov D.O. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 8, pp. 4–6.
- Komarzyniec G. 14 kVA Superconducting Transformer with REBCO Windings. – 2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors, 2017, DOI:10.1109/ELMECO.2017.8267753.
- Berger A., et al. Test Results of 60 kVA Current Limiting Transformer with Full Recovery under Load. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1384–1387.
- Xu M., et al. Generalized Critical-State Model for Hard Superconductors. – Phys. Rev. B., 1990, vol. 42, No. 16, pp. 10773–10776.
- Algarni R., et al. Enhanced Critical Current Density and Flux Pinning Traits with Dy₂O₃ Nanoparticles Added to YBa₂Cu₃O_{7-d} Superconductor. – Journal of Alloys and Compounds, 2021, vol. 852, p. 157019.
- Song W., et al. AC Loss Simulation in a HTS 3-PHASE 1 MVA Transformer Using H Formulation. – Cryogenics, 2018, vol. 94, pp. 14–21.
- Ghabeli A., et al. Optimization of Distributive Ratios of Apportioned Winding Configuration in HTS Power Transformers for Hysteresis Loss and Leakage Flux Reduction. – Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, vol. 28, No. 12, pp. 3463–3479.
- Zubko V.V., Fetisov S.S., Vysotsky V.S. Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS Cables. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 3, pp. 1–5.
- Shen B., et al. Review of the AC Loss Computation for HTS Using H Formulation. – Superconductor Science and Technology, 2020, vol. 33, No. 3, p. 033002.
- Berger A., et al. Comparison of the Efficiency of Superconducting and Conventional Transformers. – Journal of Physics: Conference Series, 2010, vol. 234, p.032004.
- Janowski T., et al. Superconducting Devices for Power Engineering. – Proceedings of the XVII National Conference on Superconductivity, 2016, vol. 130, No. 2, pp. 537–544.
- Manusov V.Z., Semenov A.V., Kriukov D.O. Computational and Experimental Study of Air-Core HTS Transformer Electrothermal Behavior at Current Limiting Mode. – International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021, vol. 11, No. 1, pp. 155–162.
- Ivanov D.M., Manusov V.Z., Semenov A.V. Experimental Studies of a High-temperature Superconducting Prototype Transformer with Current Limiting Function. – 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE): proc. Moscow, Russia, 2020, pp. 97–102.
- Lei W., et al. Film Boiling Heat Transfer Prediction of Liquid Nitrogen From Different Geometry Heaters. – International Journal of Multiphase Flow, 2020, vol. 129, p.103294.
- Zhou J., Chan W., Schwartz J. Quench Detection Criteria for YBa₂Cu₃O_{7-x} Coils Monitored via a Distributed Temperature Sensor for 77 K Cases. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 5, p.4703012.
- Pavlenko A.N., Surtaev A.S., Matsekh A.M. *Teplofizika vysokikh temperatur – in Russ. (Thermophysics of High Temperatures)*, 2007, vol. 45, No. 6, pp. 905–916.
- Manusov V.Z., Ivanov D.M., Nazarov M.K. Analyses of Electrical Parameters of Power Transformers with Superconducting Windings. – 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2019, pp. 547–551.
- Moradnouri A., et al. Survey on High-Temperature Superconducting Transformer Windings Design. – Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2020, vol. 33, No. 9, pp. 2581–2599.
- Kovalev L.K., et al. *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (Proceedings of the Russian Academy of Sciences)*, 2012, No. 6, pp. 3–26.
- Coombs T., et al. High-Temperature Superconducting (HTS) Transformer-Rectifier Flux Pump for Powering No-Insulation Superconducting Magnet with Low Characteristic Resistance. – Physica C: Superconductivity and its applications, 2019, vol. 560, pp. 1–6.
- Kondratowicz-Kucewicz B. and Wojtasiewicz G. The Proposal of a Transformer Model With Winding Made of Parallel 2G HTS Tapes With Transpositioners and its Contact Cooling System. – IEEE Transactions Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4., p. 5500405.
- Wojtasiewicz G. Fault Current Limitation by 2G HTS Superconducting Transformer-Experimental Investigation. – Acta Physica Polonica A, 2016, vol. 130, No. 2, pp. 516–520.