第49卷 第22期 2025年11月25日
DOI：10.7500/AEPS20250123003
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 22 Nov. 25, 2025

高温超导储能系统建模及故障特性分析

田梓薇[1,2]，傅显峰[3]，李 斌[1,2]，信 赢[1]，李 超[1,2]
（1. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津市 300072；2. 国家储能技术产教融合创新平台，天津市 300354；
3. 国网（金华）综合能源服务有限公司，浙江省金华市 321000）

摘要：新能源发电的不稳定性对新型电力系统的安全稳定运行产生了显著影响，而储能技术是应对该问题的有效方案。高温超导储能因其功率密度大、响应速度快等优点在平抑新能源功率波动和提升电能质量等方面展现出良好的应用潜力。为全面、深入地分析高温超导储能并网后的故障特性，文中基于高温超导储能并网系统的拓扑结构和控制策略，建立了高温超导储能并网系统仿真模型，模拟在充/放电场景下高温超导储能交流侧短路故障和直流侧磁体失超故障后的动态响应过程。在此基础上，明确了高温超导储能在充/放电场景下的故障特性差异，分析了产生差异的主要原因。最后，基于PSCAD/EMTDC对所建模型进行了功能性验证。

关键词：高温；超导储能；短路故障；磁体；失超故障；低电压穿越；功率波动

0 引言

新能源发电的不稳定性对新型电力系统的安全稳定运行产生了显著影响，而储能技术是应对该问题的有效方案[1-2]。《2030年前碳达峰行动方案》中提出，要推动新能源和储能协同发展，在分布式新能源系统中合理配置储能装置[3]。超导储能因其存储效率高、功率密度大等特点得到了越来越多的关注[4]。

目前，关于超导储能装置的研制已取得较多成果。1991年，日本研制了一台30 kJ的超导储能装置并进行了测试[5]。2008年，法国设计组装了一台800 kJ的高温超导储能装置[6]。2000年后，中国超导储能经历了快速发展，取得了诸多成果。2006年，中国科学院电工研究所研制出了国内首台兆焦级超导储能系统，并安装在甘肃白银超导变电站中[7]。2014年，华中科技大学研制出一台150 kJ/100 kW的高温超导储能试验样机[8]。2017年，中国科学院电工研究所研制的1 MJ/1 MV·A超导限流-储能系统样机在甘肃省玉门市风电场并网运行[9]。2022年，中国南方电网有限责任公司开始研发高温超导储能装置，其容量为10 MJ[10]。

一些研究积极探索如何利用超导储能装置应对电力系统面临的挑战。文献[11]利用超导储能改善含风电场电力系统的小干扰稳定性。文献[12]利用超导储能和电化学储能组成的复合储能系统来提高电网电能质量。文献[13]利用超导储能抑制直流微网中的暂态功率波动，以保证微电网的电压/频率稳定性。文献[14-15]利用超导储能平抑新能源发电的功率波动，以解决新能源发电的间歇性和随机性问题。为实现上述功能，需要在电力系统中建立有效的超导储能模型。

针对超导储能的仿真建模已有诸多研究工作。文献[16]建立了超导线圈的集中参数网络模型，有利于全面、准确地分析磁体的运行特性。文献[17]通过建立多物理场下高温超导磁体失超传播过程中的仿真模型，分析了失超过程中温度、应力等物理量的变化。文献[18]提出一种适用于平抑新能源功率波动的超导储能电压型变流器仿真模型，可以模拟正常充/放电场景下超导储能交直流侧的能量流动特性。但是，目前仍缺乏能够反映超导储能并网系统故障特性的仿真模型，这对于超导储能的安全稳定运行至关重要。

因此，本文首先研究超导储能运行控制策略并进行详细建模。在此基础上，引入低电压穿越控制策略、负序电流抑制策略和撬棒电路保护策略，实现了低电压穿越，抑制了负序电流并保证了超导储能磁体电压在安全范围内。最后，在PSCAD/EMTDC中完成了所建模型的功能性验证，并结合仿真分析了超导储能在充/放电场景下交流侧短路故障和直流侧磁体失超故障的故障特性差异。

收稿日期：2025-01-23；修回日期：2025-04-11。
上网日期：2025-07-08。
国家自然科学基金资助项目（52477025）。

1　超导储能系统结构

超导储能系统主要由超导储能磁体、功率调节系统组成。其中，功率调节系统由DC/DC斩波器、撬棒电路和变流器组成。超导储能的特点是功率密度大、响应速度快，其并网拓扑结构如图1所示。图中：PMW表示脉宽调制；PI表示比例-积分环节。

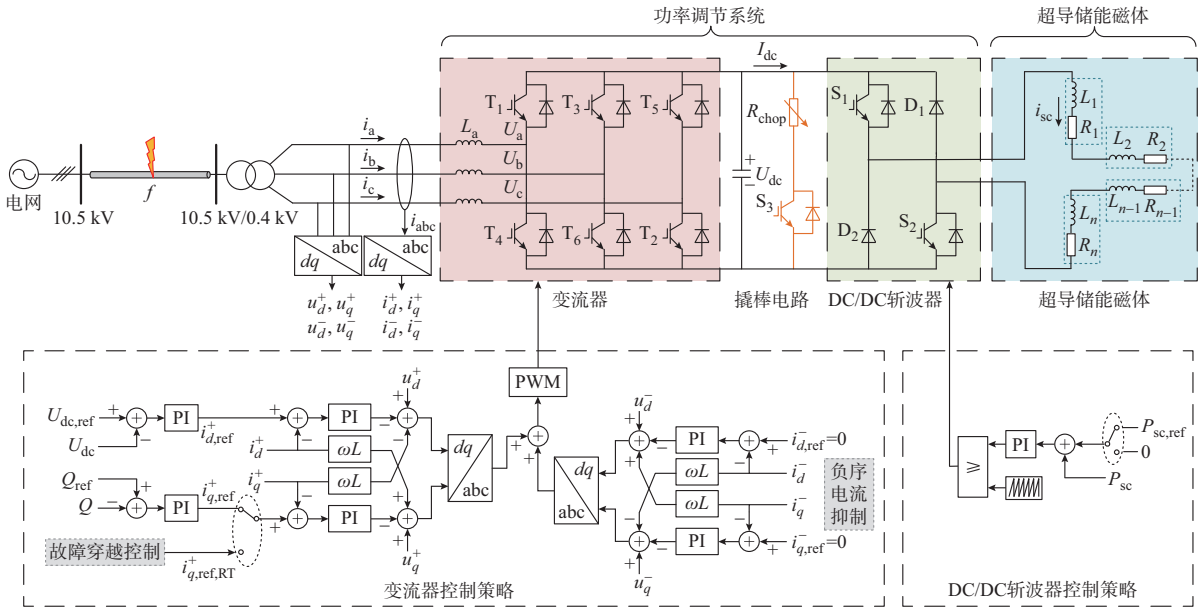


图1　超导储能系统拓扑结构和控制策略

Fig. 1　Topology and control strategy of superconducting magnetic energy storage system

1.1　超导储能磁体

超导储能磁体主要包含两种结构形式：螺线管形和环形。如附录A图A1所示，螺线管形磁体结构简单，磁力线沿着磁体从内到外形成闭合磁场，外部杂散磁场较高，适用于小规模储能；环形磁体由若干个线圈均匀排列成圆环的结构形式，在磁体内部形成闭合磁场，其杂散磁场较少，适用于大规模储能[19-21]。

1.2　功率调节系统

功率调节系统是超导储能和交流电网进行能量交换的关键环节。用于超导储能的功率调节系统由DC/DC斩波器、撬棒电路和变流器组成，超导储能系统拓扑结构如图1所示。

2　超导储能系统建模及控制策略

2.1　超导储能磁体建模

超导储能磁体通常由n个超导线圈串联组成。正常运行时每个超导线圈可以等效为零电阻的电感，失超后可以等效为阻值变化的电感。磁体的等效模型如附录A图A2所示。图中：L_i为第i个线圈电感；R_i为第i个线圈失超电阻；n为线圈总个数；i_{sc}为超导储能磁体电流；U_{sc}为超导储能磁体电压。

正常运行时，超导储能磁体呈现出零电阻的超导态，U_{sc}的计算式如式(1)所示。

$$U_{sc}=\sum_{i=1}^{n}L_i\frac{\mathrm{d}i_{sc}}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

故障失超时，超导储能磁体呈现出变电阻特性。假设m个超导线圈失超，U_{sc}的计算式如式(2)所示。

$$U_{sc}=\sum_{i=1}^{n}L_i\frac{\mathrm{d}i_{sc}}{\mathrm{d}t}+i_{sc}\sum_{i=1}^{m}R_i \tag{2}$$

超导储能磁体n个超导线圈总失超电阻R如式(3)所示。

$$R=\sum_{i=1}^{n}R_i \tag{3}$$

失超电阻产生的焦耳热Q会导致超导储能磁体温度持续上升，超导储能磁体的温升又会加剧超导储能磁体的失超，失超电阻持续增大。超导储能磁体失超产生的焦耳热Q如式(4)所示。

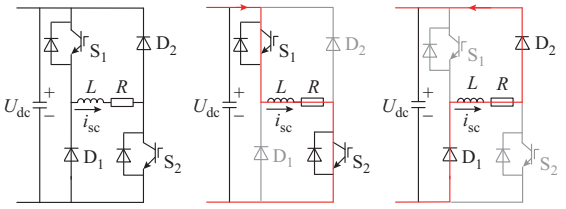
$$Q=\int_0^t i_{sc}^2R\mathrm{d}t \tag{4}$$

考虑焦耳热Q和超导储能磁体总失超电阻R的对应关系，通过实验获得Q和R的对应曲线[22]如附录A图A3所示。由图可知，磁体失超后随着焦耳热Q的增加，R逐渐增大并最终趋于一个稳定值。

2.2　DC/DC斩波器模型及控制策略

DC/DC斩波器是功率调节系统的一部分，其两端分别连接变流器的直流侧和超导储能磁体。DC/

DC斩波器拓扑结构如图2(a)所示，由两个IGBT(S_1、S_2)和两个二极管(D_1、D_2)构成。图中：U_{dc}为直流侧电压；L为超导储能磁体总电感。设S_1、S_2的导通占空比为D($0\leqslant D\leqslant 1$)，则D_1、D_2的导通占空比为$1-D$。



(a) DC/DC拓扑结构　(b) 充电模式　(c) 放电模式

图2　斩波器拓扑结构和工作模式

Fig. 2　Topology and operating modes of chopper

充电模式下S_1、S_2导通，电流通路如图2(b)所示，D_1、D_2在反向电压作用下关断。因此，超导储能磁体电压U_{sc}如式(5)所示。

$$U_{sc}=L\frac{\mathrm{d}i_{sc}}{\mathrm{d}t}+i_{sc}R=DU_{dc} \tag{5}$$

放电模式下S_1、S_2关断，电流通路如图2(c)所示，D_1、D_2在磁体电流i_{sc}作用下导通。因此，超导储能磁体电压U_{sc}如式(6)所示。

$$U_{sc}=-(1-D)U_{dc}=(D-1)U_{dc} \tag{6}$$

一个周期内磁体电压U_{sc}如式(7)所示。

$$U_{sc}=(2D-1)U_{dc} \tag{7}$$

由式(7)可以推出电流变化率$\mathrm{d}i_{sc}/\mathrm{d}t$，如式(8)所示。

$$\frac{\mathrm{d}i_{sc}}{\mathrm{d}t}=\frac{(2D-1)U_{dc}-i_{sc}R}{L} \tag{8}$$

超导储能磁体正常运行时总失超电阻R为0，当$2D-1>0$即$D>0.5$时，$\mathrm{d}i_{sc}/\mathrm{d}t>0$，超导储能工作在充电状态；当$2D-1<0$即$D<0.5$时，超导储能工作在放电状态；当$2D-1=0$即$D=0.5$时，超导储能既不充电也不放电。

DC/DC斩波器的IGBT占空比D通过超导储能输出功率P_{sc}与其参考值$P_{sc,ref}$的差值经PI控制器生成。$P_{sc,ref}$决定了超导储能的充/放电状态(正值为充电、负值为放电)，DC/DC斩波器的控制策略如图1所示。超导储能最大输出功率$P_{sc,max}$为：

$$P_{sc,max}=U_{dc}i_{sc} \tag{9}$$

根据式(7)可得超导储能的输出功率P_{sc}，如式(10)所示。

$$P_{sc}=(2D-1)U_{dc}i_{sc}=\min(P_{sc,ref},P_{sc,max}) \tag{10}$$

充电启动时，超导储能磁体电流i_{sc}从0开始增大，由于直流侧电压U_{dc}的限制，超导储能的最大输出功率$P_{sc,max}$不满足功率参考值$P_{sc,ref}$，S_1、S_2一直处于导通状态，S_1、S_2的导通占空比D等于1，超导储能磁体电压$U_{sc}=U_{dc}$。在超导储能的充电过程中，超导储能磁体电流i_{sc}不断增大，$P_{sc,max}=P_{sc,ref}$，之后S_1、S_2交替导通和关断，占空比$0<D<1$，超导储能磁体电压U_{sc}为$\pm U_{dc}$的方波。放电时，超导储能磁体电流i_{sc}不断减小，超导储能的最大输出功率$P_{sc,max}$不断减小，不再满足功率参考值$P_{sc,ref}$，S_1、S_2一直处于关断状态，占空比D等于0，超导储能磁体电压$U_{sc}=-U_{dc}$。超导储能放电结束后，超导储能磁体电压U_{sc}降为0。

2.3　变流器建模及控制策略

变流器由全控型电力电子器件构成，可以实现超导储能和电网的功率交换。通过PWM技术，变流器在电网正常运行时可以进行功率的四象限调节，从而实现超导储能的正常充放电功能。在电网发生故障后，通过低电压穿越和负序抑制(具体控制策略见图1)，可以实现故障可靠穿越。

2.3.1　正常运行控制策略

变流器的控制策略如图1所示。采用基于dq坐标系的双闭环控制策略，功率外环采用定直流电压和定无功功率控制，电流内环以功率外环输出的电流参考值$i_{d,ref}^{+}$、$i_{q,ref}^{+}$为基准，经PI控制输出变流器电压参考信号，然后经过PWM生成开关器件的脉冲信号[23-24]。外环控制方程如式(11)所示。

$$\begin{cases} i_{d,ref}^{+}=k_{p,dc}(U_{dc,ref}-U_{dc})+k_{i,dc}\int(U_{dc,ref}-U_{dc})\mathrm{d}t \\ i_{q,ref}^{+}=k_{p,Q}(Q_{ref}-Q)+k_{i,Q}\int(Q_{ref}-Q)\mathrm{d}t \end{cases} \tag{11}$$

式中：$i_{d,ref}^{+}$、$i_{q,ref}^{+}$分别为d、q轴电流正序分量参考值；$k_{p,dc}$和$k_{i,dc}$分别为定直流电压外环的比例系数和积分系数；$U_{dc,ref}$为直流侧电压参考值；$k_{p,Q}$和$k_{i,Q}$分别为定无功功率外环的比例系数和积分系数；Q_{ref}为交流侧无功功率参考值；Q为交流侧无功功率。

电流内环采用前馈解耦控制策略，消除d、q轴电流之间的耦合，实现对d、q轴电流的独立控制。电流内环控制方程如式(12)所示。

$$\begin{cases} \nu_{d}^{+}=u_{d}^{+}-\left(k_{pd}+\dfrac{k_{id}}{s}\right)(i_{d,ref}^{+}-i_{d}^{+})-\omega L_{a}i_{q}^{+} \\ \nu_{q}^{+}=u_{q}^{+}-\left(k_{pq}+\dfrac{k_{iq}}{s}\right)(i_{q,ref}^{+}-i_{q}^{+})+\omega L_{a}i_{d}^{+} \end{cases} \tag{12}$$

式中：ν_{d}^{+}、ν_{q}^{+}分别为d、q轴电压正序分量参考信号；u_{d}^{+}、u_{q}^{+}和i_{d}^{+}、i_{q}^{+}分别为交流侧d、q轴电压和电流正序分量实际值；k_{pd}、k_{pq}和k_{id}、k_{iq}分别为d、q轴电流内环的比例系数和积分系数；ω为同步角速度；L_a为交流侧滤波电感。

当超导储能运行时，需要通过限幅环节防止变流器输入/输出过载，变流器一般采用有功优先的限幅策略，如式(13)所示。

$$\begin{cases} i_{d,\max}^{+}=I_{\max} \\ i_{q,\max}^{+}=\sqrt{I_{\max}^{2}-\left(i_{d,\mathrm{ref}}^{+}\right)^{2}} \end{cases} \tag{13}$$

式中：$i_{d,\max}^{+}$、$i_{q,\max}^{+}$分别为d、q轴电流正序分量最大值；$I_{\max}$为变流器最大输出电流。

2.3.2　负序电流抑制策略

当电力系统出现三相电流不平衡时，所产生的负序电流分量可能导致变流器因过流而受损。此外，负序分量还会引发直流母线电压的二倍频波动，从而减少直流侧储能装置的使用寿命。为确保换流器及储能装置在三相电流不平衡期间的安全可靠运行，通常引入负序电流抑制环节，以降低负序电流分量并减小直流侧的倍频电压波动[25-26]。如图1所示，负序电流抑制环节首先提取负序电流，然后通过PI环节控制负序电流分量为0，达到抑制负序电流的目的。因此，超导储能变流器d、q轴电流负序分量参考值$i_{d,\mathrm{ref}}^{-}$、$i_{q,\mathrm{ref}}^{-}$如式(14)所示。

$$\begin{cases} i_{d,\mathrm{ref}}^{-}=0 \\ i_{q,\mathrm{ref}}^{-}=0 \end{cases} \tag{14}$$

2.3.3　低电压穿越控制策略

通常情况下，当外部交流电网发生短路故障并导致并网电压跌落时，根据GB/T 34120—2023《电化学储能系统储能变流器技术要求》[27]，电化学储能电站需要不脱网连续运行，这种能力被称为低电压穿越能力。目前，超导储能变流器并无明确的低电压穿越标准，但通常仍会按照文献[27]所提要求设置类似的低电压穿越控制策略。并网点电压跌落时，可以通过主动注入q轴电流的方式支撑并网点电压恢复。因此，在故障发生后，超导储能变流器q轴电流正序分量参考值$i_{q,\mathrm{ref,RT}}^{+}$如式(15)所示。

$$i_{q,\mathrm{ref,RT}}^{+}=\begin{cases} 0 & \alpha>0.9 \\ 2(0.9-\alpha)I_{\mathrm{N}} & 0.3\leqslant\alpha\leqslant0.9 \\ I_{\max} & \alpha<0.3 \end{cases} \tag{15}$$

式中：α为跌落后的并网点正序电压标幺值；I_{N}为变流器额定电流。

超导储能在故障期间的有功电流受到变流器容量的限制，如式(16)所示。

$$\begin{cases} i_{d,\max}^{+}=\sqrt{I_{\max}^{2}-\left(i_{q,\mathrm{ref}}^{+}\right)^{2}} \\ i_{q,\max}^{+}=I_{\max} \end{cases} \tag{16}$$

2.4　撬棒电路保护策略

超导储能的安全稳定运行需要保证超导储能磁体电压U_{sc}在安全电压范围内。由2.2节分析可知，U_{sc}的值等于直流侧电压U_{dc}。如果U_{dc}过大，会破坏超导储能磁体内部的结构甚至烧毁磁体。

如图1所示，为解决上述过电压问题，在变流器直流侧加装撬棒电路，当直流侧电压升至设定的阈值时，应立即合上S_3投入撬棒电阻R_{chop}，电容将通过撬棒电阻放电，直流侧电压下降，防止超导储能磁体损坏。当直流侧电压降至设定的临界值时，再关断S_3。

3　超导储能磁体失超特性分析

超导储能磁体失超包括整体失超和局部失超。整体失超是指超导装置在实际运行中，由于短路故障等原因导致超导储能磁体整体过流引起失超。局部失超是指超导带材局部发生热扰动，或因制作工艺、绕制时的拉力等问题发生局部失超[28]。

超导储能磁体通常由n个超导线圈串联组成。当m个超导线圈失超时，所有失超线圈总电压$U_{m,\mathrm{total}}$的计算式为：

$$U_{m,\mathrm{total}}=\sum_{i=1}^{m}U_i \tag{17}$$

式中：U_i为第i个失超线圈电压。

由式(2)可知，m个超导线圈失超后，每个超导线圈的电感电压的计算式为：

$$L_i\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{sc}}}{\mathrm{d}t}=\frac{U_{\mathrm{sc}}-i_{\mathrm{sc}}\sum_{i=1}^{m}R_i}{n} \tag{18}$$

S_1、S_2导通时，超导储能磁体电压$U_{\mathrm{sc}}=U_{\mathrm{dc}}$，第$i$个失超线圈电压$U_i$的计算式为：

$$U_i=L_i\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{sc}}}{\mathrm{d}t}+i_{\mathrm{sc}}R_i=\frac{U_{\mathrm{dc}}-i_{\mathrm{sc}}\sum_{i=1}^{m}R_i}{n}+i_{\mathrm{sc}}R_i \tag{19}$$

S_1、S_2关断时，超导储能磁体电压$U_{\mathrm{sc}}=-U_{\mathrm{dc}}$，第$i$个失超线圈电压$U_i$的计算式为：

$$U_i=L_i\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{sc}}}{\mathrm{d}t}+i_{\mathrm{sc}}R_i=\frac{-U_{\mathrm{dc}}-i_{\mathrm{sc}}\sum_{i=1}^{m}R_i}{n}+i_{\mathrm{sc}}R_i \tag{20}$$

4　仿真验证

本文参照图1所示拓扑，基于前文所述控制策略，在PSCAD/EMTDC仿真平台中搭建了超导储能(100 kW/500 kJ)系统模型，经2 km线路并入10 kV交流电网，其中，超导储能磁体由18个超导线圈串联成螺线管形磁体，电感为10 H。该模型的具体参数如附录B表B1所示。

4.1　充放电切换功能验证

为了验证所提出的超导储能控制策略的有效性，首先对该装置的充/放电特性以及功率调节特性进行仿真分析。定义超导储能充电时的输出有功功

率为正，放电时为负，以50 kW为功率阶跃指令。图3所示为超导储能对有功功率调节信号阶跃变化的响应曲线，当功率指令值发生变化时，超导储能能够准确跟踪。结果表明，超导储能具有功率调节的能力，可以实现充/放电模式的切换。

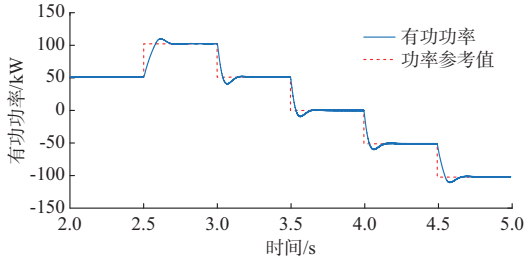


图3　超导储能输出功率的响应曲线
Fig. 3　Response curve of output power of superconducting magnetic energy storage

4.2　交流侧短路故障

4.2.1　短路故障充电场景

超导储能以100 kW恒定功率充电。t=3.0 s时在距离并网点1 km处发生两相接地故障，t=3.5 s时故障消失。交流侧和直流侧的仿真结果如图4所示。

故障前后交流侧电压如图4(a)所示，故障相电压在故障发生后瞬间跌落，并网点正序电压有效值由1.0 p.u.跌落至0.76 p.u.。故障前后交流侧电流如图4(b)所示，故障稳态电流仍保持三相对称，幅值约为额定电流的1.2倍。这是因为变流器控制策略中加入了负序电流抑制策略和电流限幅环节，故障期间负序电流抑制为0，如图4(c)中虚线所示。另外，检测到电压跌落($0.3\leqslant\alpha\leqslant0.9$)时，为支撑电网电压恢复，变流器向电网提供无功电流(i_q=0.28 p.u.)，仿真结果与将α代入式(15)的计算结果一致，如图4(c)中实线所示。

故障期间交流侧有功功率、无功功率和直流侧功率如图4(d)所示。由于故障后交流侧电压发生跌落，变流器开始向电网提供无功支撑，受限幅策略的影响，电网向变流器传输的有功功率减少。直流侧电流I_{dc}和直流侧电压U_{dc}如图4(e)所示。为了响应原有有功功率指令，直流侧电容向超导储能磁体释放能量，直流侧电流I_{dc}增大，直流侧电压U_{dc}降低，3.5 s时故障清除，U_{dc}跌落至0.75 p.u.。

4.2.2　短路故障放电场景

超导储能以100 kW恒定功率放电。t=8.0 s时在距离并网点1 km处发生非金属性三相接地故障，t=8.5 s时故障消失。交流侧和直流侧的仿真结果如图5所示。

故障前后交流侧电压如图5(a)所示。故障发生后，A、B、C三相相电压瞬间跌落，并网点正序电压有效值由1.0 p.u.跌落至0.61 p.u.。故障前后交流侧电流如图5(b)所示。故障稳态电流幅值约为额定电流的1.2倍，这是因为变流器控制策略中加入了电流限幅环节。当检测到电压跌落($0.3\leqslant\alpha\leqslant0.9$)时，为支撑电网电压恢复，变流器向电网提供无功电流(i_q=0.58 p.u.)，仿真结果与将α代入式(15)的计算结果一致，如图5(c)所示。

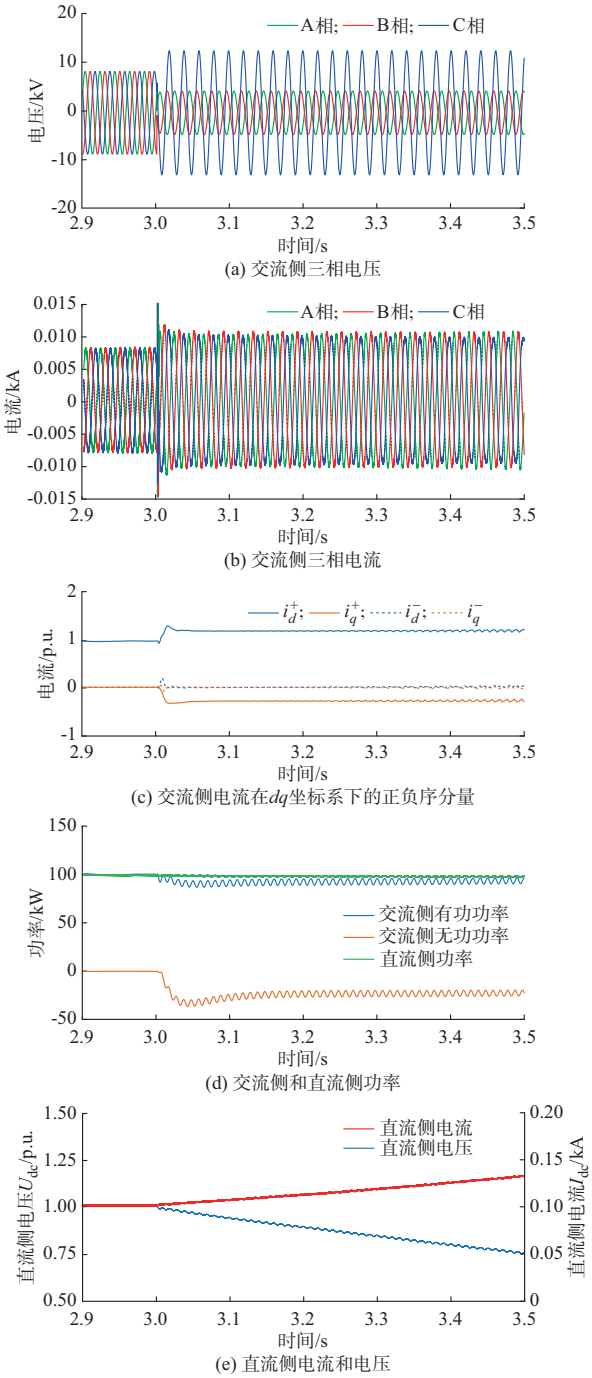


图4　两相接地故障仿真结果
Fig. 4　Simulation results under two-phase-to-ground fault

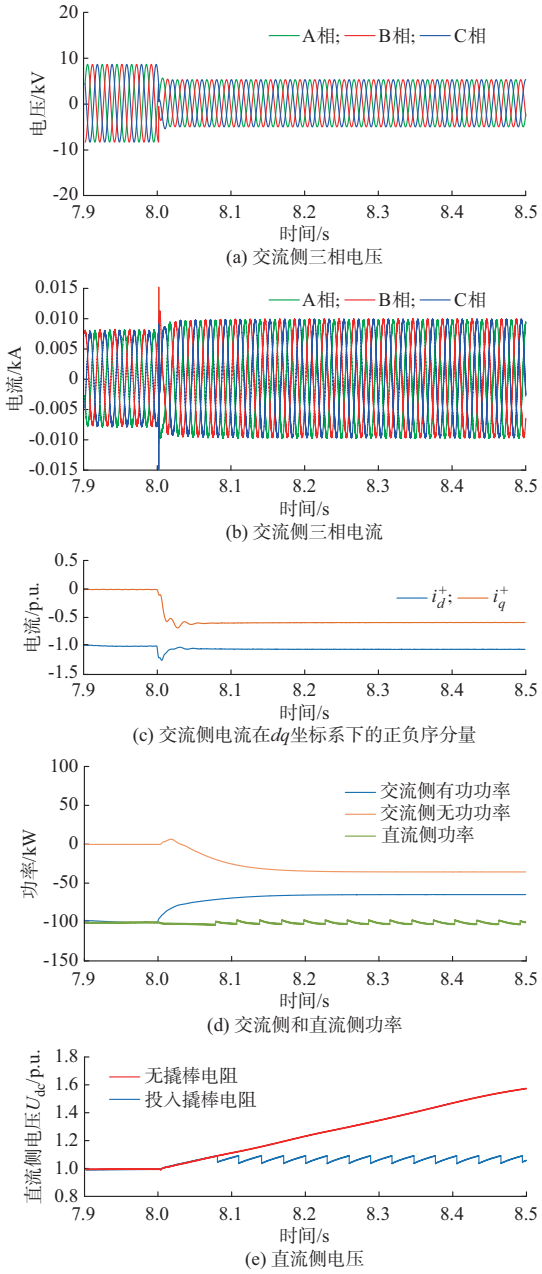


图5　三相接地故障仿真结果

Fig. 5　Simulation results under three-phase-to-ground fault

故障期间交流侧有功功率、无功功率和直流侧功率如图5(d)所示。由于故障后交流侧电压发生跌落，变流器开始向电网提供无功支撑，受限幅策略的影响，电网向变流器传输的有功功率减少。但变流器仍执行原有功功率指令，使得变流器两端有功功率不平衡，如果不投入撬棒电路，超导储能磁体释放的多余能量累积到直流侧电容，进而导致U_{dc}升高。U_{dc}波形如图5(e)红色曲线所示。可以看出，8.0～8.5 s故障期间U_{dc}一直升高，8.5 s时电压升高至1.6 p.u.。超导储能磁体电压U_{sc}的值等于直流侧电压U_{dc}，如果U_{dc}过大，会破坏超导储能磁体内部的结构甚至烧毁磁体，故当U_{dc}超过阈值时，将撬棒电路投入，直流侧电容放电使U_{dc}稳定在一定范围内。投入撬棒电路后的U_{dc}波形如图5(e)蓝色曲线所示。可见，故障后直流侧电压被很好地抑制，使超导储能磁体得到了保护。

4.3　直流侧磁体失超故障

超导储能磁体由18个超导线圈串联组成，超导储能磁体局部失超，当失超线圈个数m为0、3、9、18时，磁体的总失超电阻R分别为0、0.34、1、2 Ω。

4.3.1　磁体失超故障充电场景

超导储能以100 kW恒定功率充电。t=3.0 s时，超导储能磁体局部失超。总失超电阻R对超导储能充电的影响如图6(a)所示。随着总失超电阻R的增大，磁体电流增长越慢，磁体失超后会影响超导储能的充电速率。

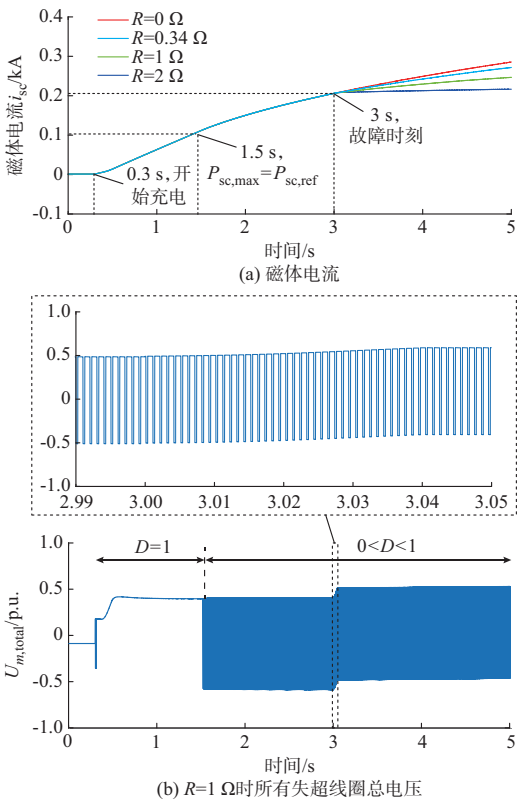


图6　充电场景下直流侧仿真结果

Fig. 6　Simulation results on DC side in charging scenario

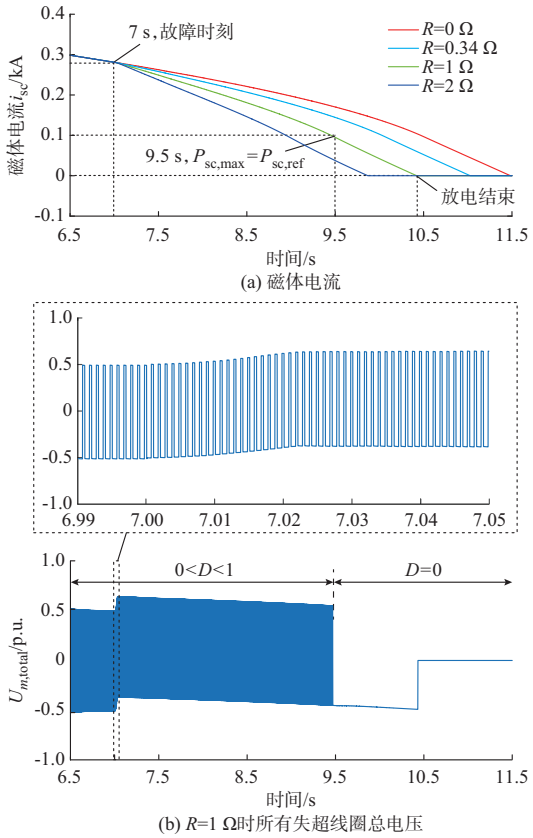
超导储能磁体失超不仅会影响磁体电流增长速率，还会影响所有失超线圈总电压。以9个超导线圈失超为例，图6(b)为这种情况下所有失超线圈总电压$U_{m,\text{total}}$的波形以及失超时刻3.0 s附近的局部放大图，具体分析如下。

由式(17)至式(20)可计算出失超线圈总电压

$U_{m,\text{total}}$的值。0.3 s时超导储能开始充电，充电启动时$P_{\text{sc,max}}<P_{\text{sc,ref}}$，DC/DC斩波器开关$S_1$、$S_2$一直导通，占空比$D=1$，$U_{m,\text{total}}$的计算值为0.5 p.u.；1.5 s时磁体电流$i_{\text{sc}}$增大至0.1 kA，$P_{\text{sc,max}}=P_{\text{sc,ref}}$，之后$S_1$、$S_2$交替导通和关断，占空比$0<D<1$，$U_{m,\text{total}}$的计算值为±0.5 p.u.，由2.2节理论分析可知，$U_{m,\text{total}}$为±0.5 p.u.的方波；3.0 s时磁体开始失超，失超后电流流过总失超电阻R产生电压降，由式(17)至式(20)可知，S_1、S_2导通时$U_{m,\text{total}}$的值增大，S_1、S_2关断时$U_{m,\text{total}}$的值减小，$U_{m,\text{total}}$发生了正向偏移。由图6(b)可知，仿真结果与理论分析一致。

4.3.2　磁体失超故障放电场景

超导储能以100 kW恒定功率放电。$t=7.0$ s时，超导储能磁体局部失超。总失超电阻R对超导储能放电的影响如图7(a)所示。随着总失超电阻R的增大，磁体电流衰减越快，磁体失超后会影响超导储能的放电速率。



(a) 磁体电流

(b) R=1 Ω时所有失超线圈总电压

图7　放电场景下直流侧仿真结果
Fig. 7　Simulation results on DC side in discharging scenario

超导储能磁体失超不仅会影响磁体电流衰减速率，还会影响所有失超线圈总电压。以9个超导线圈失超为例，图7(b)为这种情况下所有失超线圈总电压$U_{m,\text{total}}$的波形以及失超时刻7.0 s附近的局部放大图，具体分析如下。

失超前，$U_{m,\text{total}}$为±0.5 p.u.的方波；7.0 s时磁体开始失超，失超后电流流过总失超电阻R产生电压降。由式(17)至式(20)可知，S_1、S_2导通时$U_{m,\text{total}}$的值增大，S_1、S_2关断时$U_{m,\text{total}}$的值减小，$U_{m,\text{total}}$发生了正向偏移。在超导储能的放电过程中，超导储能磁体电流i_{sc}不断减小，9.5 s时磁体电流降低至0.1 kA，$P_{\text{sc,max}}=P_{\text{sc,ref}}$，之后$S_1$、$S_2$一直处于关断状态，$S_1$、$S_2$的占空比$D=0$，$U_{m,\text{total}}$不再是方波电压，超导储能放电结束后，$U_{m,\text{total}}$降为0，这与2.2节部分理论分析一致。

5　结语

本文基于超导储能并网系统拓扑结构和控制策略，搭建了超导储能的仿真模型，详细分析了超导储能在充/放电场景下的故障特性，得到以下结论：

1)本文所提出的超导储能并网系统模型可以根据功率指令变化实现充放电切换，具备低电压穿越和负序抑制功能，可以模拟超导储能交流侧短路故障和直流侧磁体失超故障的故障特性。

2)超导储能并网后，电网侧发生短路故障会导致电网向变流器传输的有功功率减少，在超导储能充/放电场景下，直流侧电压的故障暂态响应特性不同。充电场景下，直流侧电压降低；放电场景下，直流侧电压升高，投入撬棒电路后可以有效抑制电压升高。

3)在超导储能充/放电场景下，直流侧发生磁体失超故障会影响超导储能的充/放电速率。充电场景下，超导储能充电速率会随着失超电阻增大而变慢；放电场景下，超导储能放电速率会随着失超电阻增大而变快，磁体能量将快速耗散。

4)在超导储能充/放电场景下，直流侧发生磁体失超故障会导致所有失超线圈总电压出现正向偏移，线圈电压过大会导致绝缘损坏，从而影响超导储能系统的安全稳定运行。

附录见本刊网络版，点击 http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20250123003，或扫描英文摘要后二维码，可阅读全文。

参考文献

[1] 邹洋，王剑晓，戴璟，等.欧洲能源危机成因、影响与应对措施[J].电力系统自动化，2023，47(17)：1-13.
ZOU Yang, WANG Jianxiao, DAI Jing, et al. Causes, effects and countermeasures of European energy crisis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 1-13.

[2] 卓振宇，张宁，谢小荣，等.高比例可再生能源电力系统关键技

术及发展挑战[J].电力系统自动化，2021，45(9)：171-191.
ZHUO Zhenyu，ZHANG Ning，XIE Xiaorong，et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(9)：171-191.

[3] 沈赋，李施伟，王健，等.融合储能的光伏发电系统并网逆变器建模与稳定性分析[J].电力系统保护与控制，2024，52(19)：131-143.
SHEN Fu，LI Shiwei，WANG Jian，et al. Modeling and stability analysis of a photovoltaic grid-connected inverter integrated with an energy storage system[J]. Power System Protection and Control，2024，52(19)：131-143.

[4] ADETOKUN B B，OGHORADA O，ABUBAKAR S J. Superconducting magnetic energy storage systems：prospects and challenges for renewable energy applications[J]. Journal of Energy Storage，2022，55：105663.

[5] IRIE F，TAKEO M，SATO S，et al. A field experiment on power line stabilization by a SMES system[J]. IEEE Transactions on Magnetics，1992，28(1)：426-429

[6] TIXADOR P，BELLIN B，DELEGLISE M，et al. Design and first tests of a 800 kJ HTS SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2007，17(2)：1967-1972.

[7] DAI S T，XIAO L Y，WANG Z K，et al. Development and demonstration of a 1 MJ high-Tc SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2012，22(3)：5700304.

[8] 徐颖，任丽，唐跃进，等.150 kJ/100 kW直接冷却高温超导磁储能系统[J].储能科学与技术，2015，4(4)：394-401.
XU Ying，REN Li，TANG Yuejin，et al. A 150 kJ/100 kW directly cooled high temperature superconducting electromagnetic energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology，2015，4(4)：394-401.

[9] 郭文勇，蔡富裕，赵闯，等.超导储能技术在可再生能源中的应用与展望[J].电力系统自动化，2019，43(8)：2-14.
GUO Wenyong，CAI Fuyu，ZHAO Chuang，et al. Application and prospect of superconducting magnetic energy storage for renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems，2019，43(8)：2-14.

[10] LONG Feiyang，XU Ying，REN Li，et al. AC loss calculation on a 10 MJ/5 MW HTS SMES with hybrid winding structure[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2024，34(8)：1-5

[11] 姜惠兰，李希钰，白玉苓.提高多机系统小干扰稳定性的DFIG-SMES协调控制策略[J].电网技术，2022，46(3)：915-922.
JIANG Huilan，LI Xiyu，BAI Yuling. DFIG-SMES coordinated control strategy for improving small signal stability of multi-machine system[J]. Power System Technology，2022，46(3)：915-922.

[12] LIU Y J，LI H，ZHANG X A，et al. V2G integration based on a UPQC with SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2024，34(8)：1-3.

[13] ZHANG T L，ZHOU Q，MU S，et al. Voltage-based segmented control of superconducting magnetic energy storage for transient power fluctuation suppression in island DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2021，31(8)：1-5.

[14] LI C，CAO Y Z，LI B，et al. A novel low voltage ride-through scheme for DFIG based on the cooperation of hybrid energy storage system and crowbar circuit[J]. Journal of Energy Storage，2023，73：108879.

[15] JIN J X，WANG J，YANG R H，et al. A superconducting magnetic energy storage with dual functions of active filtering and power fluctuation suppression for photovoltaic microgrid[J]. Journal of Energy Storage，2021，38：102508.

[16] LIU Wenxu，DAI Shaotao，MA Tao，et al. Voltage distribution characteristic of the D-shaped coil of HTS-SMES under high-frequency impulse[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2022，32(9)：1-10.

[17] NIU M D，XIA J，YONG H D，et al. Quench characteristics and mechanical responses during quench propagation in rare earth barium copper oxide pancake coils[J]. Applied Mathematics and Mechanics，2021，42(2)：235-250.

[18] 雷勇，林晓冬.超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用[J].高电压技术，2019，45(3)：983-992.
LEI Yong，LIN Xiaodong. Application of hybrid energy storage system based on SMES and BESS in smoothing the power fluctuations of wind farms[J]. High Voltage Engineering，2019，45(3)：983-992.

[19] 王静，朱英伟，李兆鑫，等.一种自适应寻找高温超导储能磁体最优结构的方法[J].低温与超导，2019，47(11)：40-44.
WANG Jing，ZHU Yingwei，LI Zhaoxin，et al. A method for adaptively finding the optimal structure of high temperature superconductingenergy storage magnets[J]. Cryogenics and Superconductivity，2019，47(11)：40-44.

[20] LIU W X，DAI S T，MA T，et al. Electromagnetic optimization of a hybrid toroidal magnet for 10 MJ HTS SMES system[J]. Physica C：Superconductivity and Its Applications，2024，626：1354589.

[21] LI C，YANG W C，LI B，et al. The dynamic resistance of multi-layer conductor on round core cables for SMES systems[J]. Journal of Energy Storage，2024，99：113426.

[22] LIANG S Y，TANG Y J，REN L，et al. A novel simplified modeling method based on R-Q curve of resistive type SFCL in power systems[J]. Physica C：Superconductivity and Its Applications，2019，563：82-87.

[23] 李斌，李博睿，李超，等.考虑过充/过放的电化学储能电站建模及故障特性分析[J].电力系统自动化，2024，48(14)：119-128.
LI Bin，LI Borui，LI Chao，et al. Modeling and fault characteristic analysis of electrochemical energy storage station considering overcharging/overdischarging[J]. Automation of Electric Power Systems，2024，48(14)：119-128.

[24] 张家琪，刘朋印，谢小荣，等.适用于故障特性分析的锂离子电池储能电磁暂态建模方法[J].电力系统自动化，2023，47(7)：166-173.
ZHANG Jiaqi，LIU Pengyin，XIE Xiaorong，et al. Electromagnetic transient modeling method of lithium-ion battery energy storage system for fault characteristic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(7)：166-173.

[25] 何安然，侯凯，王小红，等.不对称条件下的储能虚拟同步发电机低电压穿越控制技术[J].电力系统自动化，2018，42(10)：122-127.

HE Anran, HOU Kai, WANG Xiaohong, et al. A low voltage ride through control technique for energy storage virtual synchronous generator under asymmetric condition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (10): 122-127.

[26] 李超,李博睿,李斌,等.功率方向元件在电化学储能电站接入配电网中的适应性分析[J].电力系统自动化,2025,49(11):126-135.
LI Chao, LI Borui, LI Bin, et al. Adaptability analysis of power directional elements in electrochemical energy storage power stations connected to distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49 (11): 126-135.

[27] 电化学储能系统储能变流器技术要求:GB/T 34120—2023 [S].北京:中国标准出版社,2023.
Technical requirements for power conversion system of electrochemical energy storage system: GB/T 34120—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

[28] 杨志星,任丽,徐颖,等.二代高温超导带材失超特性研究[J].电工技术学报,2024,39(1):110-120.
YANG Zhixing, REN Li, XU Ying, et al. Study on quench characteristics of second-generation high temperature superconducting tapes [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 110-120.

田梓薇(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向:储能并网技术。E-mail:tianziwei2021@163.com

傅昱峰(1985—),男,硕士,主要研究方向:储能并网技术。

李 斌(1976—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统保护与控制、柔性直流电网控制保护。E-mail:binli@tju.edu.cn

李 超(1988—),男,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统保护与控制、超导电力应用。E-mail:lichao_tju@126.com

(编辑 代长振)

Modeling and Fault Characteristic Analysis for High-temperature Superconducting Magnetic Energy Storage System

TIAN Ziwei[1,2], *FU Xianfeng*[3], *LI Bin*[1,2], *XIN Ying*[1], *LI Chao*[1,2]

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. National Industry-Education Platform of Energy Storage, Tianjin 300354, China;
3. State Grid (Jinhua) Comprehensive Energy Services Co., Ltd., Jinhua 321000, China)

Abstract: The instability of renewable energy power generation has exerted a significant impact on the safe and stable operation of new power systems, and the energy storage technology serves as an effective solution to address this issue. Owing to its advantages such as high power density and fast response speed, the high-temperature superconducting magnetic energy storage (HTS-SMES) demonstrates promising application potential in mitigating power fluctuations of renewable energy sources and enhancing power quality. To comprehensively and thoroughly analyze the fault characteristics of HTS-SMES after grid integration, this paper establishes a simulation model of the HTS-SMES grid-connected system based on its topological structure and control strategy. The model simulates the dynamic response processes following an AC-side short-circuit fault and a DC-side magnet quench fault on the HTS-SMES side in both charging and discharging scenarios. On this basis, the differences in fault characteristics of HTS-SMES in charging and discharging scenarios are clarified, and the primary reasons for these differences are analyzed. Finally, the functionality of the established model is validated using PSCAD/EMTDC.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52477025).

Key words: high-temperature; superconducting magnetic energy storage; short-circuit fault; magnet; quench fault; low-voltage ride through; power fluctuation