

不对称短路故障下电池储能影响交流系统 短路电流机理及算法

霍启迪¹,唐晓骏¹,马世英¹,刘英培²,田仕杰²,梁海平²

(1. 中国电力科学研究院有限公司 电网安全与节能国家重点实验室,北京 100192;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 电池储能系统(BESS)在国内外电力系统中已得到快速发展和广泛应用,但对BESS影响短路电流机理认识尚不深入,且现有短路电流计算标准均未涉及交流系统发生不对称短路故障时考虑BESS影响的短路电流计算方法。基于BESS电磁暂态模型,分析不对称短路故障下BESS电压源换流器(VSC)外环控制器控制方式、VSC外环控制器限幅策略、BESS额定容量及故障前输送功率、BESS低电压穿越策略、电池过放保护策略等因素对BESS输出电流的影响机理。在此基础上研究不对称短路故障及不同限幅策略下BESS影响交流系统短路电流的机理,研究结果发现BESS输出无功电流越大,其提供短路电流分量与交流系统提供短路电流分量相位差越小,BESS对短路电流助增影响越大。最后提出适用于不对称短路故障下考虑BESS影响的交流系统短路电流迭代算法,并与工程上常用算法进行横向对比,验证所提算法的有效性与优越性。研究成果能为精确评估交流系统短路电流水平、合理设置BESS控制保护参数提供参考。

关键词: 电池储能系统;不对称短路故障;短路电流;影响因素;迭代算法

中图分类号: TM 713

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202112029

0 引言

“双碳”背景下为加快构建清洁低碳能源体系,我国能源结构正逐步从传统能源向新能源转型^[1-2],源网荷的高度电力电子化是智能电网发展的趋势之一。负荷侧分布式电源、储能、微电网等蓬勃发展。但风光等分布式电源具有波动性和随机性,其大规模接入电网会产生系统等效转动惯量减小以及调压、调频能力减弱等问题^[3-4],而储能可以提高系统对新能源的消纳能力,提高电力系统的安全性、稳定性和经济性^[5-7]。

近年来,随着电池储能系统(BESS)在电力系统中得到广泛应用,其对交流系统短路电流水平的影响也受到学术界和工程界的广泛关注。短路电流计算作为电力系统三大计算之一,其主要目的是确定短路故障的严重程度,分析系统中负序及零序电流的分布,为电气装备选择、继电保护整定等提供理论依据。伴随电网结构的不断加强,负荷中心和电源密集接入地区的短路电流水平已接近断路器的额定遮断能力^[8-9],BESS在电力系统占比不断增大,导致准确的短路电流获取困难,严重影响继电保护整定和开关安全遮断能力校核。

随着“双碳”进程的不断推进,BESS大规模、分布式并网对交流系统短路电流水平的影响更加无法

忽视,故研究BESS影响交流系统短路电流机理并进行量化评估具有迫切现实意义。且现有短路电流计算标准均未涉及交流系统发生不对称短路故障时BESS向交流系统馈入电流机理及短路电流计算方法,工程上常用的PSASP、PSD-BPA等仿真软件也缺乏相关计算能力,给BESS短路电流水平的精确评估带来困难。

目前,已有学者研究了交直流混联系统交流侧发生短路故障时直流侧贡献短路电流机理。文献[10]研究了逆变侧交流系统短路时柔性直流向短路点馈入电流的机理和暂态过程。文献[11]研究了传统高压直流输电系统交流侧故障时直流系统提供短路电流的特性。文献[12]指出当交流系统发生三相短路故障时柔性直流换流站呈电流源特性,其输出短路电流与换流站控制方式、运行模式以及控制器的控制保护参数有关。文献[13]基于序分量法提出不同故障形式下基于电压源换流器(VSC)的高压直流输电(VSC-HVDC)系统贡献短路电流数学模型和计算方法,认为VSC-HVDC系统贡献交流短路电流为与短路点相连的所有VSC贡献的正、负、零序短路电流叠加和,其中正、负序短路电流与换流站控制参数有关,零序短路电流主要与零序网络有关。文献[14]认为对称短路故障下受端模块化多电平换流器(MMC)贡献短路电流主要来源于MMC向交流系统注入无功功率,不对称短路故障下短路电流主要与受端MMC向交流系统注入无功功率及换流变压器零序阻抗大小有关,并提出短路电流抑制策略。此

收稿日期:2021-04-21;修回日期:2021-11-02

基金项目:中国电力科学研究院有限公司科技项目(XT83-20-005)

Project supported by the Science and Technology Foundation of CEPRI(XT83-20-005)

外,有学者对交直流混联系统短路电流算法展开研究。文献[15]所述基于分段函数的实用计算方法可以计算直流侧贡献短路电流。文献[16]研究了工程上常用算法(不计影响法、数值叠加法、简化矢量法等)的适应性,并比较不同算法精度差异及误差来源。

在此背景下,本文基于PSCAD/EMTDC搭建BESS电磁暂态模型,分析了VSC外环控制器控制方式、VSC外环控制器限幅策略、BESS额定容量及故障前输送功率、BESS低电压穿越策略、电池过放保护策略等因素对不对称短路故障下BESS输出电流的影响。研究了不对称短路故障下BESS影响交流系统短路电流的机理,完成了不对称短路故障下BESS采用不同限幅策略对短路电流影响的分析验证。提出了适用于不对称短路故障下考虑BESS影响的交流系统短路电流迭代算法,并与工程上常用算法进行横向对比,验证了所提算法的有效性与优越性。

1 BESS基本结构及工作原理

典型BESS由储能电池、DC/DC变换器、VSC、升压变压器、电池管理系统及监控系统等组成,其拓扑结构及控制系统见附录A图A1。由图中BESS拓扑结构可见,当储能电池充电时,VSC工作在整流状态,双向DC/DC变换器运行于Buck模式,有功功率由电网流向BESS;当储能电池放电时,VSC工作在有源逆变状态,双向DC/DC变换器运行于Boost模式,有功功率由BESS流向电网,从而实现能量的双向流通和循环利用^[17]。

根据瞬时功率理论^[18],BESS母线处有功功率、无功功率(直流分量)实际值的表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_d^+ i_d^+ + u_q^+ i_q^+ + u_d^- i_d^- + u_q^- i_q^-) \\ Q = \frac{3}{2} (u_q^+ i_d^+ - u_d^+ i_q^+ + u_q^- i_d^- - u_d^- i_q^-) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 、 Q 分别为BESS母线处有功功率、无功功率(直流分量)实际值; i_d^+ 、 i_q^+ 和 i_d^- 、 i_q^- 分别为BESS母线处正序电流和负序电流的 d 轴、 q 轴分量; u_d^+ 、 u_q^+ 和 u_d^- 、 u_q^- 分别为BESS母线处正序电压和负序电压的 d 轴、 q 轴分量。

当 dq 同步旋转坐标系的 d 轴以正序电压为基准时,正序电压在 q 轴上的投影为0,且考虑BESS具有负序电流抑制能力,此时式(1)可化简为式(2)。

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_d^+ i_d^+ \\ Q = -\frac{3}{2} u_d^+ i_q^+ \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可见,分别控制BESS输出正序电流 d

轴分量和正序电流 q 轴分量即可调节BESS输送的有功功率和无功功率。

根据附录A图A1所示控制系统,并结合上述分析可见:BESS采用基于正负序分离方法的锁相环(PLL)准确追踪BESS母线处正序电压相位,为整个控制系统提供相位参考;VSC外环控制器根据控制目标选择控制方式(定有功功率、定无功功率、定直流电压、定交流电压控制方式等),并经过比例积分(PI)运算为VSC内环电流控制器提供电流参考值的 d 轴、 q 轴分量,而VSC内环电流控制器通过调节VSC桥臂电动势使电流 d 轴、 q 轴分量快速跟踪其参考值的 d 轴、 q 轴分量;VSC双闭环控制器通过采用 dq 轴解耦电路分别控制正序电流 d 轴、 q 轴分量,并完成负序电流抑制;在VSC双闭环控制器的作用下,BESS输出正序电流 d 轴、 q 轴分量并根据式(2)实现对输送功率的解耦控制。

2 不对称短路故障下BESS输出电流影响因素及机理分析

不对称短路故障下BESS输出电流特性主要受VSC外环控制器控制方式、VSC外环控制器限幅策略、BESS额定容量和故障前输送功率、BESS低电压穿越策略以及电池过放保护策略等因素影响,下面逐一分析各因素对BESS输出电流的影响,在此基础上深入研究不对称短路故障下BESS影响交流系统短路电流机理。

2.1 VSC外环控制器控制方式影响

VSC外环控制器控制方式及其PI参数的选取将直接影响短路故障后BESS输出电流的暂态调节过程。按照控制目标进行分类,VSC外环控制器控制方式分为有功类控制方式和无功类控制方式,其中有功类控制方式主要包括定有功功率控制方式和定直流电压控制方式,无功类控制方式主要包括定无功功率控制方式和定交流电压控制方式。

VSC外环控制器在选取控制方式时以定有功功率控制方式和定交流电压控制方式为例,其传递函数如式(3)所示。

$$\begin{cases} \dot{i}_{dref}^+ = k_{p,p} (P_{ref} - P) + k_{i,p} \int (P_{ref} - P) dt \\ \dot{i}_{qref}^+ = k_{p,q} (U_{acref} - u_d^+) + k_{i,q} \int (U_{acref} - u_d^+) dt \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{ref} 为BESS输送有功功率参考值; U_{acref} 为VSC交流侧电压参考值; i_{dref}^+ 、 i_{qref}^+ 分别为VSC内环电流控制器中正序电流参考值 d 轴、 q 轴分量; $k_{p,p}$ 、 $k_{i,p}$ 分别为定有功功率控制方式下VSC外环控制器比例、积分系数; $k_{p,q}$ 、 $k_{i,q}$ 分别为定交流电压控制方式下VSC外环控制器比例、积分系数。此时VSC外环控制器结构框图如图1所示。

当BESS并网点(PCC)发生不对称短路故障时,

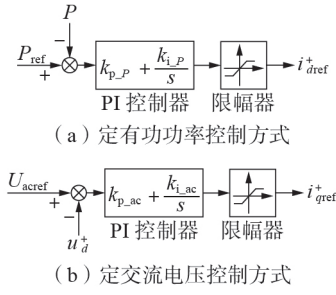


图1 定有功功率控制与定交流电压控制方式下VSC外环控制器结构框图

Fig.1 Structure block diagram of outer-loop controller of VSC under constant active power control and constant AC voltage control modes

P/u_d 瞬间下降导致 i_{dref}^+/i_{qref}^+ 急剧增大至限幅值。由图1可见,VSC外环控制器PI参数对短路故障后 i_{dref}^+/i_{qref}^+ 的调节速度起到主导作用,对于已经确定的控制目标量而言,VSC外环控制器PI参数主要影响短路故障后 i_{dref}^+/i_{qref}^+ 的暂态调节速度,而VSC内环控制器PI参数将对 i_d^+/i_q^+ 跟踪 i_{dref}^+/i_{qref}^+ 的调节过程起到主导作用。由于PI控制器本身存在的快速性和波动性的矛盾,在跟踪调节速度更快的 i_{dref}^+/i_{qref}^+ 过程中 i_d^+/i_q^+ 会产生更显著的波动。

比较2种有功类控制方式下VSC外环控制器输出 i_{dref}^+ 的变化,定直流电压控制方式相比定有功功率控制方式下跟踪有功功率跌落更加迅速,使控制系统可以瞬间增大短路电流 d 轴分量的输出,定直流电压与定有功功率控制方式下 i_{dref}^+/i_d^+ 波形如图2所示,图中 $i_{dref}^+、i_d^+$ 均为标么值,后同。

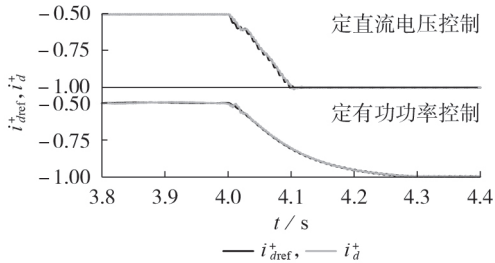


图2 定直流电压控制与定有功功率控制方式下 $i_{dref}^+、i_d^+$ 波形

Fig.2 Waveforms of i_{dref}^+ and i_d^+ under constant DC voltage control and constant active power control modes

由图2可见:当有功类控制方式选取定直流电压控制方式时,在0.11 s内 i_{dref}^+ 已达到最大限幅值,调节过程迅速,暂态过程较短;当有功类控制方式选取定有功功率控制方式时, i_{dref}^+ 响应有功功率跌落,从故障前水平跌落至限幅值的耗时约为0.31 s,暂态调节过程时间较定直流电压控制方式长。比较 i_d^+ 暂态调节过程中的幅值波动,调节速度更快的定直流电压控制方式下 i_d^+ 在暂态调节期间波动更加明显。

由于2种无功类控制方式下 i_{qref}^+ 和 i_q^+ 的暂态调节过程与2种有功类控制方式下的情况类似,本文不再叙述,仅给出定交流电压与定无功功率控制方式下 $i_{qref}^+、i_q^+$ 波形图,如附录A图A2所示。

2.2 VSC外环控制器限幅策略影响

当BESS运行时,需要通过限幅控制来对流过IGBT的电流加以限制以防止器件过流而损坏。常见的限幅策略包括有功优先、无功优先、等比例限幅、等比例有功优先等。

采用有功优先限幅策略时优先保证 i_{dref}^+ 输出,再根据式(4)来确定正序电流限幅值 q 轴分量。

$$i_{qlim}^+ = \sqrt{I_{max}^2 - (i_{dref}^+)^2} \quad (4)$$

式中: i_{qlim}^+ 为VSC外环控制器正序电流限幅值 q 轴分量; I_{max} 为最大允许电流。

当采用无功优先限幅策略时优先保证 i_{qref}^+ 输出,再根据式(5)来确定正序电流限幅值 d 轴分量。

$$i_{dlim}^+ = \sqrt{I_{max}^2 - (i_{qref}^+)^2} \quad (5)$$

式中: i_{dlim}^+ 为VSC外环控制器正序电流限幅值 d 轴分量。

等比例限幅策略是将正序电流限幅根据式(6)进行限制,且 $i_{dref}^+、i_{qref}^+$ 按相同比例进行限制。

$$i^+ = \sqrt{(i_{dref}^+)^2 + (i_{qref}^+)^2} = I_{max} \quad (6)$$

式中: i^+ 为VSC外环控制器正序电流限幅值。等比例有功优先限幅策略是在等比例限幅基础上将 i_{qlim}^+ 设置为0.5 p.u.,从而优先保证 i_{dref}^+ 输出。

综合上述分析,VSC外环控制器采用4种不同限幅策略时设置的限幅约束条件如表1所示。以额定容量10 MV·A、输送有功功率为8 MW、输送无功功率为5 Mvar的BESS为例,研究PCC发生bc两相短路故障下VSC外环控制器限幅策略对BESS输出电流的影响。基于PSCAD/EMTDC仿真后发现,VSC外环控制器采用表1所示4种不同限幅策略将使BESS输出电流幅值相同,但相位差别较大,表中数据均为标么值。

表1 常见限幅策略及设置的限幅约束条件

Table 1 Common limiting strategies and their setting limiting constraints

限幅策略	限幅约束条件		
	i_{dlim}^+	i_{qlim}^+	I_{max}
有功优先	I_{max}	$\sqrt{I_{max}^2 - (i_{dref}^+)^2}$	1
无功优先	$\sqrt{I_{max}^2 - (i_{qref}^+)^2}$	I_{max}	1
等比例限幅	I_{max}	I_{max}	1
等比例有功优先	I_{max}	0.5	1

2.3 BESS额定容量及故障前输送功率影响

BESS在定有功功率、定无功功率控制方式下运行时,可以通过潮流计算求解其输出电流;而在故障

后稳态阶段, BESS输出电流通常为额定输出电流的1~1.2倍。即故障前、后 BESS输出电流如式(7)所示。

$$\begin{cases} I_{\text{BESS0}} = \frac{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}{\sqrt{3} U_{\text{BESS}}} \\ I_{\text{BESS1}} = K_{\text{max}} \frac{S_{\text{BESSN}}}{\sqrt{3} U_{\text{BESSN}}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_{BESS0} 、 I_{BESS1} 分别为故障前 BESS输出电流、故障后稳态阶段 BESS输出电流; P_0 、 Q_0 分别为故障前 BESS向交流系统输送的有功功率、无功功率; U_{BESS} 为 BESS输出电压; K_{max} 为限幅倍数; S_{BESSN} 为 BESS额定容量; U_{BESSN} 为 BESS额定输出电压。由式(7)可见: 故障前 BESS输送的功率直接影响故障后 BESS输出电流的初始值; 故障后稳态阶段 BESS输出电流达到限幅约束, 限幅倍数越大, BESS输出电流越大; 在相同的限幅倍数下 BESS额定容量越大, 故障后 BESS输出电流越大。

为了便于分析, 选取升压变压器低压侧电流作为 BESS输出电流, 此时 U_{BESSN} 取 0.69 kV。设置如下3种组合: ① $P_0=5$ MW, $Q_0=1$ Mvar, $S_{\text{BESSN}}=10$ MV·A; ② $P_0=9$ MW, $Q_0=1$ Mvar, $S_{\text{BESSN}}=10$ MV·A; ③ $P_0=9$ MW, $Q_0=1$ Mvar, $S_{\text{BESSN}}=15$ MV·A。根据式(7)计算3种组合下 I_{BESS0} 分别为 4.27、7.58、7.58 kA, I_{BESS1} 分别为 8.37、8.37、12.55 kA。

为验证上述计算结果的准确性, 在 PSCAD / EMTDC上设置4 s时 PCC发生 bc两相短路故障, 3种组合下 BESS输出电流电磁暂态仿真波形图见附录A图A3。由图可见: 仿真结果与计算结果基本一致: 故障前当 BESS向交流系统输送的有功功率分别为5 MW与9 MW且无功功率为1 Mvar时, 其输出电流分别为4.27 kA和7.58 kA; 当 BESS额定容量分别为10 MV·A与15 MV·A时, 由于达到限幅约束, 故障后稳态阶段 BESS输出电流分别为8.37 kA和12.55 kA。因此 BESS额定容量及故障前输送功率对短路前、后 BESS输出电流有较大影响。

2.4 BESS低电压穿越策略影响

GB / T 34120—2017《电化学储能系统储能变流器技术规范》及 GB / T 36547—2018《电化学储能系统接入电网技术规定》规定: 电化学储能系统接入公共电网后应具备一定的低电压穿越能力。当电网发生故障或受到扰动而引起 PCC处母线电压跌落时, 具有低电压穿越能力的 BESS能够不间断并网运行, 甚至向电网提供一定的无功功率以支持电网电压恢复, 直到电网恢复到正常运行状态。

故设计基于电网电压实时反馈的 i_{qref}^+ 曲线如图3所示。图中, U_{PCC}^+ 为 PCC处正序电压, i_{qref}^+ 为负表示 VSC输出无功电流, 二者均为标幺值, 后同。由图可知, 自电网发生故障导致 PCC处母线电压跌落直到

恢复至正常水平(0.85 p.u.)的过程中, BESS输出动态无功电流与 U_{PCC}^+ 呈线性关系。

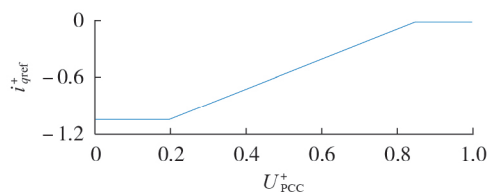


图3 低电压穿越时 i_{qref}^+ 与 U_{PCC}^+ 的关系

Fig.3 Relationship between i_{qref}^+ and U_{PCC}^+ under low-voltage ride-through condition

根据上述动态无功支撑机理, 设计 BESS在低电压穿越时的控制保护策略: VSC实时追踪电网电压情况, 在自身允许的范围内向电网注入连续稳定的无功电流, 以协助电网电压恢复, 减小电网电压崩溃的可能; 而一旦电网电压恢复, BESS能在较短的时间内恢复到故障前工作状态; 当 PCC处母线电压持续低于0.2 p.u., BESS可以闭锁退出或脱网运行。

设 BESS的运行参数为 $S_{\text{BESSN}}=10$ MV·A、 $P_0=9$ MW、 $Q_0=0$, 在 PSCAD / EMTDC上设置4 s时 PCC发生 bc两相短路故障, 故障持续时间为0.2 s, U_{PCC}^+ 、 i_{qref}^+ 、 i_q^+ 波形如图4所示, 图中 i_q^+ 为标幺值, 后同。由图可知, 4 s时 PCC发生 bc两相短路故障, U_{PCC}^+ 由故障前正常水平迅速跌落至0.545 p.u., 而 i_{qref}^+ 按图3所示曲线随 U_{PCC}^+ 的跌落而线性增大并最终稳定在-0.488 p.u.; 0.2 s时故障清除, U_{PCC}^+ 迅速恢复至故障前正常水平, 而 i_{qref}^+ 按图3所示曲线随 U_{PCC}^+ 的恢复而线性减小, BESS最终完成低电压穿越过程。在整个低电压穿越过程中, i_q^+ 跟踪调节速度较快的 i_{qref}^+ 时会产生一定波动, 但能在较短的时间内趋于稳定。

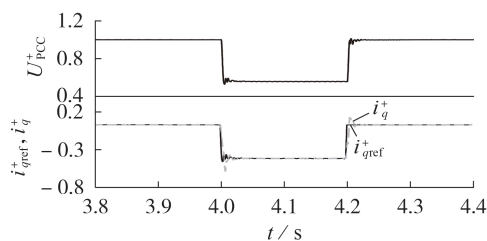


图4 低电压穿越时 U_{PCC}^+ 、 i_{qref}^+ 、 i_q^+ 波形

Fig.4 Waveforms of U_{PCC}^+ , i_{qref}^+ and i_q^+ under low-voltage ride-through condition

2.5 电池过放保护策略影响

当储能电池荷电状态(SOC)低于一定值时, 为防止电池过度放电, 储能电池管理系统将触发保护装置闭锁 BESS, 此时 BESS的输出短路电流较 SOC正常情况下有所不同。

以额定容量为10 MV·A、输送有功功率为9 MW、输送无功功率为1 Mvar的 BESS为例, 在 PSCAD / EMTDC上设置4 s时 PCC发生 bc两相永久性短路故障

障, BESS 输出电流及 SOC 波形如图 5 所示。图中, i_{BESSabc} 为 BESS 输出三相电流; Q_{SOC} 为 SOC 值。由图可知, 4 s 时 PCC 发生 bc 两相永久性短路故障, BESS 输出电流由故障前的 7.58 kA 快速上升至 8.37 kA, 但由于故障期间电池持续放电, 4.64 s 时 Q_{SOC} 达到电池过放保护整定值(5%), 此时储能电池管理系统触发保护装置闭锁 BESS, BESS 输出电流经过短暂波动后迅速下降为 0。

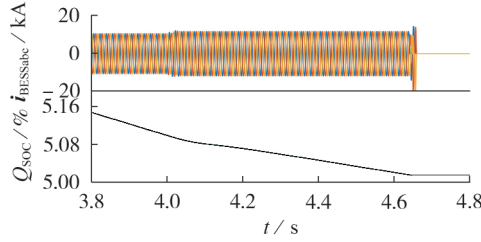


图5 BESS 输出电流及 SOC 波形

Fig.5 Waveforms of output current of BESS and SOC

2.6 不对称短路故障下 BESS 影响交流系统短路电流机理

短路故障下 BESS 并网模型如图 6 所示。图中, U_s 为交流系统等值电压源电压相量; U_{BESS} 为 VSC 出口处电压相量; U_{PCC} 为 PCC 电压相量; I_{AC} 为交流系统等值电压源输出电流相量; I_{BESS} 为 VSC 输出电流相量; I_{PCC} 为升压变压器输出电流相量; U_f 为短路点电压相量; I_f 为短路点短路电流相量; Z_T 为升压变压器阻抗; Z_{s1} 、 Z_{s2} 为交流系统发生短路故障时的等效阻抗, 特殊情况下, 当 PCC 发生短路故障时, $Z_{s2}=0$, Z_{s1} 为交流系统等值电压源的内阻抗。

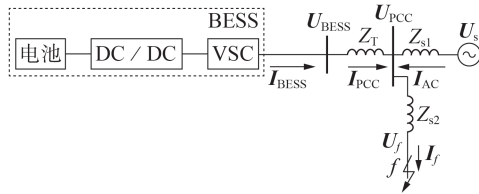


图6 短路故障下各电流分量关系

Fig.6 Relationship of current components under short circuit fault

由于升压变压器 T 的 Yd11 接线方式阻断了零序电流通路且 BESS 具有负序电流抑制能力, 交流系统发生不对称短路故障时 BESS 仅输出正序电流, 其幅值受 BESS 额定容量及限幅倍数影响, 其相位受 VSC 外环控制器限幅策略影响。而 BESS 输出电流通过复合序网与交流系统等值电压源一起提供短路电流, 进而影响短路电流。此外, 复合序网中各元件参数对短路电流也有较大影响。

以 VSC 外环控制器限幅策略为例研究不对称短路故障下 BESS 采用不同限幅策略对短路电流影响。不同限幅策略通过改变 BESS 输出电流中 i_d^+ 、 i_q^+ 的比

例从而影响 BESS 提供短路电流分量与交流系统提供短路电流分量相位差, 进而影响短路电流。考虑实际系统中各元件 $R \ll X$, 当 VSC 外环控制器中的 d 轴分量以交流系统电压为基准时, BESS 输出电流中 i_q^+ 的比例越高, BESS 提供短路电流分量与交流系统提供短路电流分量相位差越小, BESS 对短路电流的助增效果越大。最严重情况下, 当 i_q^+ 为 BESS 能够输出的最大允许电流 I_{max} , 此时 BESS 提供短路电流分量与交流系统提供短路电流分量同相位, 两电流叠加后短路点短路电流幅值最大。

3 不对称短路故障下考虑 BESS 影响的短路电流迭代算法

3.1 BESS 并网模型复合序网

BESS 并网模型交流系统发生短路故障时各电流分量关系如图 6 所示。图中 BESS 并网模型 a 相正序、负序、零序等值电路如附录 A 图 A4 所示。BESS 以 a 相为特殊相, 根据单相接地短路、两相短路、两相短路接地时短路点边界条件分别构造 BESS 并网模型复合序网图, 见附录 A 图 A5。

3.2 短路电流迭代算法

本文提出的不对称短路故障下考虑 BESS 影响的短路电流迭代算法, 通过在复合序网中采用前推回代的方式迭代求解短路点短路电流。

首先将附录 A 图 A5 所示各复合序网化简为戴维南等效电路形式, 如图 7 所示。图中, U_{eq} 为戴维南等效电路等效电压源电压相量; Z_{eq} 为等效阻抗; S_{BESSa} 为 VSC 输出的 a 相复功率; S_{eq} 为输入等效电压源的复功率; U_{BESSa1} 为 VSC 出口处 a 相正序电压相量; I_{BESSa1} 为 VSC 输出 a 相正序电流相量。

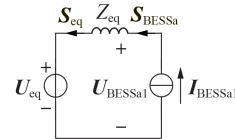


图7 戴维南等效电路

Fig.7 Equivalent circuit under Thevenin's theorem

给定迭代初始值 $U_{\text{BESSa1}} = U_{\text{eq}}$, 进入式(8)所示计算过程。

$$\begin{cases} S_{\text{BESSa}} = U_{\text{BESSa1}} (i_d^+ + j i_q^+) \\ I_{\text{BESSa1}} = \sqrt{(i_d^+)^2 + (i_q^+)^2} \\ S_{\text{eq}} = S_{\text{BESSa}} - I_{\text{BESSa1}}^2 Z_{\text{eq}} \\ U_{\text{BESSa1}} = U_{\text{eq}} + \left(\frac{S_{\text{eq}}}{U_{\text{eq}}} \right)^* Z_{\text{eq}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_{BESSa1} 为 U_{BESSa1} 的幅值; I_{BESSa1} 为 I_{BESSa1} 的幅值。通过式(8)便完成了第一轮计算, 为了提高计算精度, 可以重复式(8)的计算。即采用上一轮计算结果

U_{BESSa1} 进入下一轮计算,直到某一轮计算结果与上一轮计算结果的容许误差小于 10^{-5} 时退出迭代计算过程。

将最终的迭代计算结果代入附录A图A5所示复合序网即可求得图6中各节点处a相正序、负序、零序电压相量和各支路a相正序、负序、零序电流相量。再经过对称分量法变换矩阵,可以求得图6中各节点处三相电压相量和各支路三相电流相量。

以PCC发生bc两相短路故障为例,将式(8)的迭代计算结果代入式(9)所示计算过程,即可求解短路点三相短路电流相量 $I_{\text{fa}}、I_{\text{fb}}、I_{\text{fc}}$ 。

$$\begin{cases} I_{\text{BESSa1}} = i_d^+ \angle \varphi_{U_{\text{BESSa1}}} + i_q^+ \angle (\varphi_{U_{\text{BESSa1}}} - \pi/2) \\ U_{\text{PCCa1}} = U_{\text{BESSa1}} - I_{\text{BESSa1}} Z_{\text{T1}} \\ I_{\text{fa1}} = \frac{U_{\text{PCCa1}}}{Z_{\text{s21}} + Z_{\text{s22}} + Z_{\text{s12}}} \\ I_{\text{fa2}} = -I_{\text{fa1}} \\ I_{\text{fa0}} = 0 \\ I_{\text{fa}} = I_{\text{fa1}} + I_{\text{fa2}} + I_{\text{fa0}} \\ I_{\text{fb}} = a^2 I_{\text{fa1}} + a I_{\text{fa2}} + I_{\text{fa0}} \\ I_{\text{fc}} = a I_{\text{fa1}} + a^2 I_{\text{fa2}} + I_{\text{fa0}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\varphi_{U_{\text{BESSa1}}}$ 为 U_{BESSa1} 的相位; U_{PCCa1} 为PCC处a相正序电压相量; a 为对称分量法变换矩阵的变换因子; $I_{\text{fa1}}、I_{\text{fa2}}、I_{\text{fa0}}$ 分别为 I_{fa} 的正序、负序、零序分量。

4 仿真验证结果及分析

4.1 不对称短路故障下BESS采用不同限幅策略对短路电流影响验证

以额定容量为 $10 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 、输送有功功率为 8 MW 、输送无功功率为 5 Mvar 的BESS为例,PCC发生bc两相短路故障时不同限幅策略下短路电流对比如表2所示。表中, $\varphi_{I_{\text{PCCa1}}}$ 为 I_{PCCa1} 的相位; $\varphi_{I_{\text{Aca1}}}$ 为 I_{Aca1} 的相位; I_{fc} 为 I_{fc} 的幅值。由表可知:有功优先、等比例有功优先、等比例限幅、无功优先限幅策略下 i_q^+ 依次增大,BESS输出电流与交流系统提供短路电流分量相位差依次减小,短路点c相短路电流依次增大,BESS对短路电流的助增效果依次增大,即交流系统发生短路故障时若控制BESS大量输出无功电流以恢复交流母线电压,短路电流水平较大;若控制BESS大

表2 不同限幅策略下短路电流对比

Table 2 Comparison of short circuit currents under different limiting strategies

限幅策略	i_q^+	$ \varphi_{I_{\text{PCCa1}}} - \varphi_{I_{\text{Aca1}}} / (^\circ)$	$I_{\text{fc}} / \text{kA}$
有功优先	0	103.9075	7.2617
无功优先	0.8482	39.5644	7.4137
等比例限幅	0.7071	54.9514	7.3861
等比例有功优先	0.4472	75.9765	7.3347

量输出有功电流,短路电流水平较小。仿真结果与2.6节理论分析结果一致。

4.2 短路电流迭代算法有效性验证

以额定容量为 $10 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 、输送有功功率为 1 MW 、输送无功功率为 9 Mvar 、采用无功优先限幅策略的BESS为例,PCC发生bc两相短路故障时短路电流计算结果与仿真结果对比如表3所示。表中, I_{PCCa1} 为 I_{PCCa1} 的幅值; U_{PCCa1} 和 $\varphi_{U_{\text{PCCa1}}}$ 分别为 U_{PCCa1} 的幅值和相位; $\varphi_{I_{\text{fc}}}$ 为 I_{fc} 的相位; $I_{\text{PCCa1}}、U_{\text{PCCa1}}$ 为标么值。各电气量仿真结果见附录A图A6。由表3和图A6可见,短路电流计算结果与仿真结果相差极小,故本文提出的适用于不对称短路故障下考虑BESS影响的交流系统短路电流迭代算法可行且有效。

表3 计算结果与仿真结果对比

Table 3 Comparison between calculative results and simulative results

结果	I_{PCCa1}	$\varphi_{I_{\text{PCCa1}}} / (^\circ)$	U_{PCCa1}	$\varphi_{U_{\text{PCCa1}}} / (^\circ)$	$I_{\text{fc}} / \text{kA}$	$\varphi_{I_{\text{fc}}} / (^\circ)$
计算	1	-90.0001	0.5104	-0.0001	7.4461	0.0025
仿真	1	-90.0115	0.5104	-0.0037	7.4499	0.0279

4.3 短路电流迭代算法优越性验证

以额定容量为 $10 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 、输送有功功率为 8 MW 、输送无功功率为 -5 Mvar 的BESS为例,PCC发生bc两相短路故障时不同算法计算结果对比如附录A表A1所示。以仿真结果为基准,由表A1整理得到不同算法误差对比如附录A表A2所示。

由表2、3、A1、A2可见:在交流系统短路电流量化评估时,不计影响法忽略BESS等新设备并网对短路电流水平的影响导致评估结果过于乐观,给电力系统的安全运行带来潜在风险;数值叠加法将BESS最大输出电流与交流系统提供短路电流分量直接进行幅值叠加导致评估结果过于保守,将增加设备投资压力;简化矢量法忽略BESS输出有功电流对短路电流水平的影响而将BESS输出无功电流与交流系统提供短路电流分量进行幅值加减,较数值叠加法具有更小的误差,在对精度要求不高的情况下可以作为工程上常用短路电流评估方法;本文迭代算法在复合序网中采用前推回代的方式迭代求解短路电流,误差极小,特别适用于对精度要求较高的情况(如交流系统短路电流水平接近或达到开关额定遮断容量时的评估)。

BESS吸收无功功率时交流系统短路电流水平被削弱,此时采用数值叠加法进行代数求和运算无法准确评估短路电流,而简化矢量法和迭代算法通过矢量求和运算可以兼顾无功功率反转的情况;但简化矢量法忽略有功电流和各元件阻抗角对电压电流相位的影响,将各相量近似到 dq 轴上进行幅值加减,存在一定的误差;而迭代算法考虑了上述因素的

影响,计算结果更精确,但计算过程繁琐复杂。

此外,当短路点距离PCC较远时采用不计影响法、数值叠加法和简化矢量法无法准确评估短路电流水平,给继电保护的整定工作带来一定困难,而基于电网实际模型的迭代算法可以准确评估各点处短路电流水平。由此可见,进一步完善BESS控制方式、细化各电流相量处理方法、创新计算方法、提高计算精度、简化计算过程是短路电流算法的发展方向。

5 结论

本文分析了不对称短路故障下BESS输出电流影响因素,研究了BESS采用不同限幅策略对短路电流影响,并提出了适用于不对称短路故障下考虑BESS影响的交流系统短路电流迭代算法,得出如下结论。

1)交流系统发生不对称短路故障时,由于升压变压器T的Yd11接线方式阻断了零序电流通路且BESS具有负序电流抑制能力,BESS呈正序电流源特性,其输出电流幅值主要取决于BESS额定容量 S_{BESS} 和限幅倍数 K_{max} ,输出电流相位与VSC外环控制器限幅策略、实际系统各元件参数等有关。

2)考虑实际系统中各元件 $R \ll X$,故障穿越期间BESS无功支撑能力越大,其提供短路电流分量相位越接近交流系统提供短路电流分量相位,两电流叠加后短路点短路电流幅值将越大。最严重情况下,当 i_q^* 为最大允许电流 I_{max} 时,BESS提供短路电流分量与交流系统提供短路电流分量同相位,两电流叠加后短路点短路电流幅值最大;反之,故障穿越期间BESS无功支撑能力越小,其提供短路电流分量相位将远离交流系统提供短路电流分量相位,两电流叠加后短路点短路电流幅值较小。故BESS对短路电流的助增效果与对无功功率/电压的支撑效果同时存在,在选择BESS控制方式时应综合考虑受端电网需求。

3)本文提出的不对称短路故障下考虑BESS影响的短路电流迭代算法可以精确评估各点处短路电流水平,为继电保护的整定工作提供理论参考,并与其他算法对比后验证了其优越性。

4)此外,BESS降功率运行或短路点距离PCC较远时BESS对短路电流助增效果较小,有时甚至可以忽略不计,在评估短路电流水平时是否需要考虑这些情况值得进一步深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.

CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.

[2] 邹才能,赵群,张国生,等. 能源革命:从化石能源到新能源[J]. 天然气工业,2016,36(1):1-10.

ZOU Caineng, ZHAO Qun, ZHANG Guosheng, et al. Energy revolution: from a fossil energy era to a new energy era[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 1-10.

[3] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):1-8,25.

LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8, 25.

[4] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.

TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.

[5] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2008,32(7):1-9.

ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.

[6] 田春峰,孙玉树,唐西胜,等. 储能提高微网稳定性的仿真实验分析[J]. 电测与仪表,2018,55(5):33-37.

TIAN Chunzheng, SUN Yushu, TANG Xisheng, et al. Simulation experiment of energy storage improving micro-grid stability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(5): 33-37.

[7] 肖晋宇,侯金鸣,杜尔顺,等. 支撑电力系统清洁转型的储能需求量化模型与案例分析[J]. 电力系统自动化,2021,45(18):9-17.

XIAO Jinyu, HOU Jinming, DU Ershun, et al. Quantitative model and case study of energy storage demand supporting clean transition of electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 9-17.

[8] 刘昇,徐政. 联于弱交流系统的VSC-HVDC稳定运行区域研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):133-144.

LIU Sheng, XU Zheng. Study on stable operating region of VSC-HVDC connected to weak AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 133-144.

[9] 张玉红,张彦涛,贺静波,等. 考虑短路电流直流分量超标影响的断路器开断能力等效折算方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(23):7522-7530.

ZHANG Yuhong, ZHANG Yantao, HE Jingbo, et al. Equivalent conversion method for the breaking capacity of breaker considering excessive DC component of the short-circuit current[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7522-7530.

[10] 唐晓骏,韩民晓,霍启迪,等. 柔性直流影响交流系统短路电流的机理及量化评估方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(增刊1):1-14.

TANG Xiaojun, HAN Minxiao, HUO Qidi, et al. Mechanism and quantitative evaluation method of VSC-HVDC influencing short circuit current in AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement 1): 1-14.

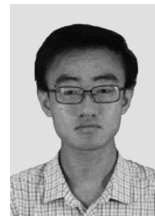
[11] 王铁柱,万磊,张彦涛,等. 交流侧单相短路时直流系统提供短路电流的特性分析[J]. 电网技术,2016,40(7):1970-1977.

WANG Tiezhu, WAN Lei, ZHANG Yantao, et al. A study of characteristic of short-circuit current contributed by DC systems with single-phase short-circuit fault on AC side[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1970-1977.

[12] 卜广全,李英彪,王姗姗,等. MMC对交流系统三相短路故障

- 短路电流影响的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6303-6312.
- BU Guangquan, LI Yingbiao, WANG Shanshan, et al. Analysis of the short-circuit current of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6303-6312.
- [13] 易杨, 沈豫, 林章岁. 柔性直流输电系统贡献交流短路电流的特性分析及计算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2150-2158.
- YI Yang, SHEN Yu, LIN Zhangsui. Characteristics and analysis methods of AC short-circuit current contributed by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2150-2158.
- [14] 茆书睿, 徐政, 杨健, 等. 交流系统短路故障下MMC对短路电流的影响及抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 134-149.
- MAO Shurui, XU Zheng, YANG Jian, et al. Influence analysis and control strategy of MMC on AC short circuit current under short circuit fault of AC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 134-149.
- [15] 王铁柱, 万磊, 卜广全, 等. 逆变侧交流系统三相短路时直流系统贡献短路电流的机理和计算方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1313-1319.
- WANG Tiezhu, WAN Lei, BU Guangquan, et al. Mechanism and calculation method study of DC system contributed short-circuit current with three-phase short-circuit fault on inverter side[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1313-1319.
- [16] 郭明星, 霍启迪, 赵鹏飞, 等. 柔性直流贡献短路电流影响因素及工程算法误差分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 143-150.
- GUO Mingxing, HUO Qidi, ZHAO Pengfei, et al. Influence factors of VSC-HVDC contribution short circuit current and error analysis of engineering calculation method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(7): 143-150.
- [17] 曹生允, 宋春宁, 林小峰, 等. 用于电池储能系统并网的PCS控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 93-98.
- CAO Shengyun, SONG Chunling, LIN Xiaofeng, et al. Study of PCS's control strategy for battery energy storage grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 93-98.
- [18] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 73-77.

作者简介:



霍启迪

霍启迪(1991—),男,河北邢台人,工程师,硕士,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等(E-mail: huoqidi@epri.sgcc.com.cn);

唐晓骏(1979—),男,河南南阳人,教授级高级工程师,博士,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等(E-mail: tangxj@epri.sgcc.com.cn);

马世英(1969—),男,山东安丘人,教授级高级工程师,博士,研究方向为电力系统稳定等(E-mail: mashiying@epri.sgcc.com.cn);

刘英培(1982—),女,河北保定人,副教授,博士,通信作者,研究方向为直流输电、直流配电技术、新能源发电与并网技术等(E-mail: liuyingpei_123@126.com)。

(编辑 王欣竹)

Mechanism and algorithm of short circuit current in AC system affected by BESS under asymmetric short circuit faults

HUO Qidi¹, TANG Xiaojun¹, MA Shiyang¹, LIU Yingpei², TIAN Shijie², LIANG Haiping²

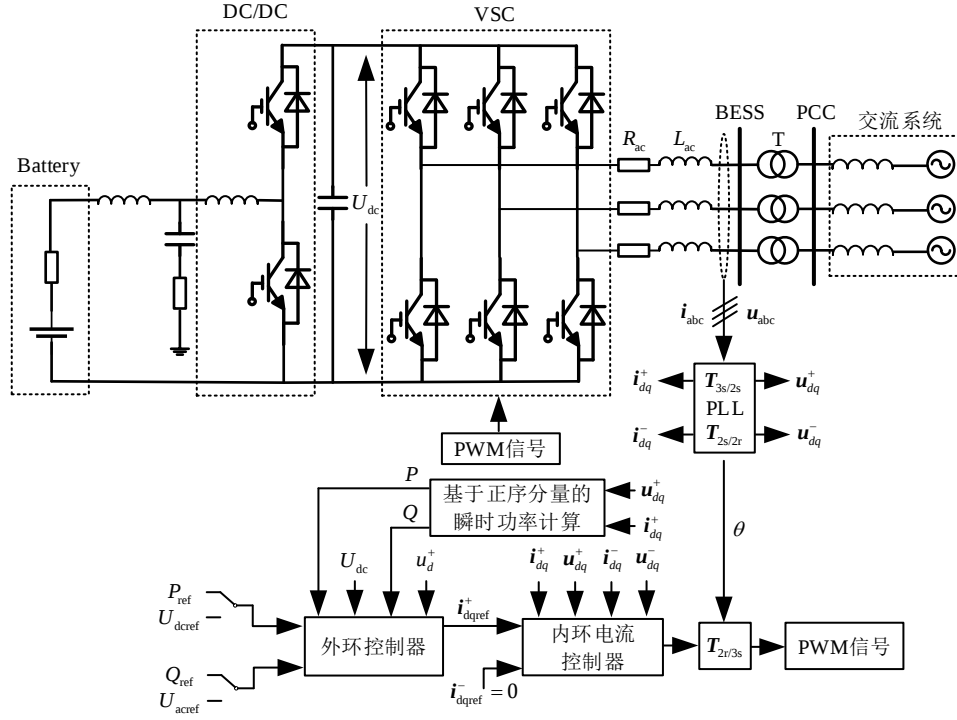
(1. State Key Laboratory of Grid Security and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: BESS (Battery Energy Storage System) has been rapidly developed and widely used in domestic and foreign power grids. However, there is no in-depth study on the mechanism of short circuit current affected by BESS, and the existing short circuit current calculation standards do not involve calculation method of short circuit current in AC system considering the influence of BESS under asymmetric short circuit faults. Based on the electromagnetic transient model of BESS, the influence mechanism on the output current of BESS under asymmetric short circuit faults is analyzed, such as control mode of outer loop controller of VSC (Voltage Source Converter) of BESS, limiting strategy of outer loop controller of VSC, rated capacity and transmission power of BESS before fault occurs, LVRT (Low-Voltage Ride-Through) strategy of BESS and over-discharge protection strategy of battery. On this basis, the mechanism of short circuit current affected by BESS under asymmetric short circuit faults and different limiting strategies is studied. The study results show that with the increasing reactive power output current of BESS, the phase difference between the short circuit current component provided by BESS and the short circuit current component provided by AC system is smaller, moreover the influence of short circuit current contributed by BESS is stronger. Finally, the iteration algorithm of short circuit current in AC system affected by BESS under asymmetric short circuit faults is proposed. Compared with several common algorithms, the effectiveness and superiority of the proposed algorithm are verified. The research results can provide reference for accurate evaluation of short circuit current level in AC system and reasonable setting of control and protection parameters of BESS.

Key words: BESS; asymmetric short circuit fault; short circuit currents; influence factor; iteration algorithm

附录 A



注: U_{dc} 为 VSC 直流侧电压; R_{ac} 、 L_{ac} 分别为 VSC 交流侧等效电阻、电抗; BESS 母线位于升压变压器低压侧; PCC 母线位于升压变压器高压侧; u_{abc} 、 i_{abc} 为 BESS 母线处三相电压、电流; u_{dq}^+ 、 u_{dq}^- 、 i_{dq}^+ 、 i_{dq}^- 分别为 BESS 母线处 dq 轴正序电压、负序电压、正序电流、负序电流; θ 为 BESS 母线处 a 相正序电压相位; P 、 Q 分别为 BESS 母线处有功功率、无功功率(直流分量)实际值; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为 BESS 输送有功功率、无功功率参考值; U_{dcref} 、 U_{acref} 分别为 VSC 直流侧、交流侧电压参考值; i_{dqref}^+ 、 i_{dqref}^- 分别为 VSC 内环电流控制器中 dq 轴正序、负序电流参考值; u_d^+ 为 BESS 母线处 d 轴正序电压。

图 A1 BESS 拓扑结构及控制系统图

Fig.A1 Topology of BESS and diagram of control system

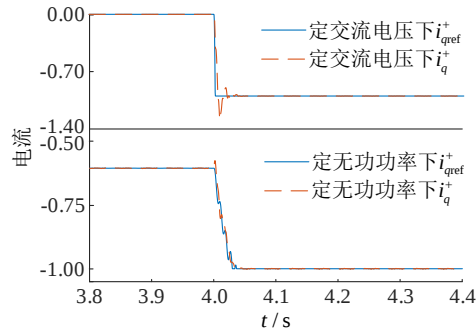


图 A2 定交流电压与定无功功率控制方式下 i_{qref}^+ 、 i_q^+ 波形

Fig.A2 Waveforms of i_{qref}^+ and i_q^+ under constant AC voltage control and constant reactive power control

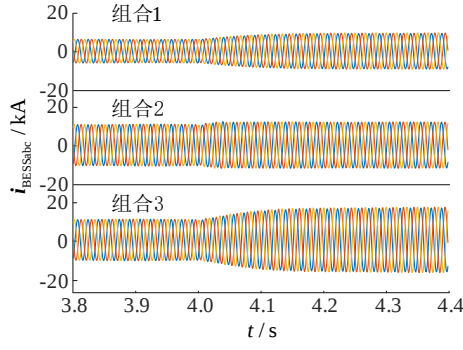
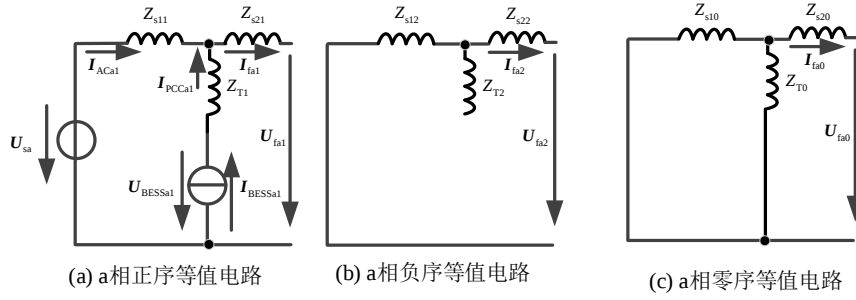


图 A3 不同功率、容量组合下 BESS 输出电流波形

Fig.A3 Waveform of output current of BESS under different combinations of transmission power and capacity



注： U_{sa} 为交流系统等值电压源 a 相电压相量； U_{BESSa1} 为 VSC 出口处 a 相正序电压相量； U_{fa1} 、 U_{fa2} 、 U_{fa0} 分别为短路点 a 相正序、负序、零序电压相量； I_{BESSa1} 为 VSC 输出 a 相正序电流相量； I_{PCCa1} 为升压变压器输出 a 相正序电流相量； I_{ACa1} 为交流系统等值电压源输出 a 相正序电流相量； I_{fa1} 、 I_{fa2} 、 I_{fa0} 分别为短路点 a 相正序、负序、零序短路电流相量； Z_{s11} 和 Z_{s21} 为交流系统发生短路故障时的正序等效阻抗； Z_{s12} 和 Z_{s22} 为交流系统发生短路故障时的负序等效阻抗； Z_{s10} 和 Z_{s20} 为交流系统发生短路故障时的零序等效阻抗； Z_{T1} 、 Z_{T2} 、 Z_{T0} 分别为升压变压器正序、负序、零序阻抗。

图 A4 BESS 并网模型 a 相正序、负序、零序等值电路

Fig.A4 Positive-sequence, negative-sequence and zero-sequence equivalent circuit of grid-tied model of BESS

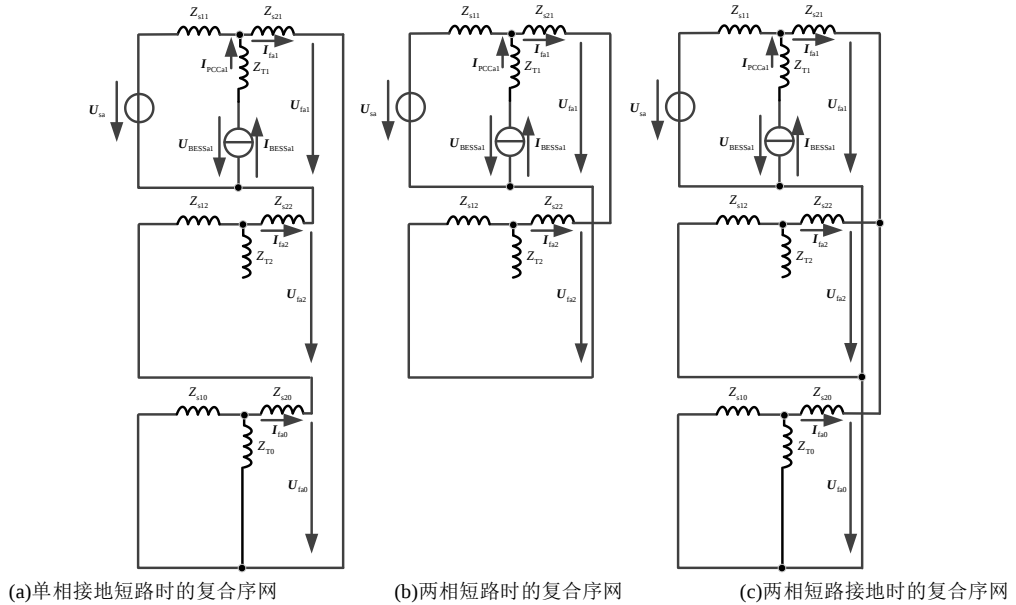


图 A5 不对称短路故障下 BESS 并网模型复合序网

Fig.A5 Compound sequence networks of grid-tied model of BESS under asymmetric short circuit fault

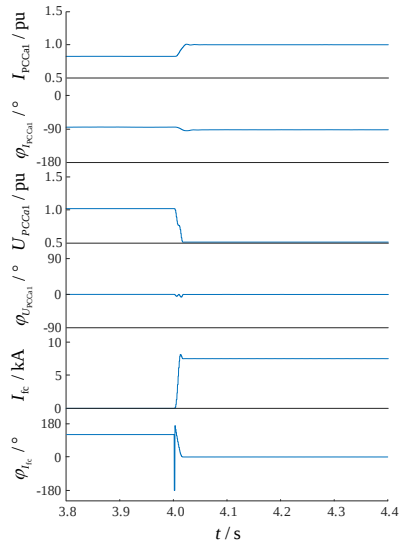


图 A6 各电气量仿真波形

Fig.A6 Waveforms of electrical quantities

表 A1 不同算法计算结果对比

Table A1 Comparison of calculative results under different calculation methods

单位: kA

不同算法	限幅策略	I_{PCCa1}	I_{ACa1}	I_{fa1}	I_{fc}
本文 迭代算法	有功优先	0.175	4.232	4.193	7.263
	无功优先	0.175	4.299	4.124	7.143
	等比例限幅	0.175	4.283	4.141	7.173
	等比例有功优先	0.175	4.266	4.158	7.202
不计影响法	—	0	4.212	4.212	7.295
数值叠加法	—	0.175	4.124	4.299	7.446
简化矢量法	有功优先	0	4.212	4.212	7.295
	无功优先	0.175	4.299	4.124	7.143
	等比例限幅	0.124	4.274	4.150	7.188
	等比例有功优先	0.078	4.250	4.172	7.227
PSCAD/EMT DC 仿真	有功优先	0.175	4.233	4.200	7.269
	无功优先	0.175	4.302	4.124	7.137
	等比例限幅	0.175	4.281	4.143	7.169
	等比例有功优先	0.175	4.268	4.162	7.205

注: I_{ACa1} 为 I_{ACa1} 的幅值。

表 A2 不同算法误差对比

Table A2 Comparison of errors under different calculation methods

不同算法	误差/%			
	有功优先	无功优先	等比例限幅	等比例有功优先
本文迭代算法	0.08	0.08	0.06	0.04
不计影响法	0.36	2.29	1.76	1.25
数值叠加法	2.43	4.40	3.86	3.34
简化矢量法	0.36	0.08	0.27	0.31