2025年5月

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.03.015

低频输电系统控制对差动保护影响及优化策略

史艳刚¹,朱海勇¹,陆立文¹,陆翌²,邱德锋¹,林艺哲¹
(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102;
2.国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江杭州 310000)

摘 要: 双端低频输电系统中低频线路故障时, 换频器采用负序电流抑制策略抑制故障电流, 线路两侧电流表现为 弱馈和穿越特性, 造成传统基于相量的线路差动保护灵敏度降低甚至拒动。为解决上述问题, 首先, 在基于模块化 多电平矩阵变换器(modular multilevel matrix converter, M3C) 拓扑的双端低频输电系统中, 分析低频线路单相接地 和两相短路的故障电气特征及相量差动保护适应性; 然后, 提出一种故障控制策略, 通过抑制功率站正序电流输出 显化故障特征, 改善差动保护动作性能, 进而提高保护灵敏度; 最后, 搭建某低频输电工程实时数字仿真(real-time digital simulator, RTDS) 模型, 针对典型故障对所提控制策略开展仿真验证。结果表明, 所提故障控制策略可以有效 解决低频线路故障下相量差动保护灵敏度不足的问题, 具有良好的工程应用价值。

关键词:模块化多电平矩阵变换器(M3C);低频输电系统;正序电流抑制策略;低频线路故障特征;低频线路保护; 相量差动保护

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)03-0160-10

0 引言

基于模块化多电平矩阵变换器(modular multilevel matrix converter, M3C)拓扑的柔性低频输 电技术是频率低于工频的新型交流输电技术,其兼 具交流输电的电磁感应变压、电流过零开断特性, 以及直流输电的控制灵活、响应迅速优点,在中远 距离海上风电送出及城市电网柔性互联等方面有 显著优势^[1-6]。目前已建成投运的浙江台州 35 kV 低频输电示范工程和杭州 220 kV 柔性低频输电工 程中,关键设备有换频阀及其控制保护系统、低频 变压器、低频线路等。

相量差动保护是传统交流系统中广泛应用的 保护原理。电力电子型电源对故障的不确定性响 应可能影响相量差动保护的性能。因此,有必要分 析其在双端低频输电系统中的适应性,并提出相应 的控制策略优化措施^[7-9]。现有研究已在光伏并 网、海上风电送出、柔直输电等场景下,针对变流 器控制作用对交流继电保护的影响取得了一定成 果^[10-16],可为双端低频输电系统低频线路故障分析 及保护适应性分析提供参考。

在低频系统故障控制策略及差动保护适应性分析方面,已有一些研究成果。在保护适应性分析方面,文献[8]指出风机和 M3C 的负序电流抑制策略会抑制线路故障电流,影响差动保护灵敏度,但

收稿日期: 2024-08-18;修回日期: 2024-11-02

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2401100); 国家电网有限公司科技项目(5211DS22002C) 未提出提升保护灵敏度的方法。文献[17]提出基 于采样值差动的保护原理,文献[18]提出基于交叉 熵的新型纵联保护方案,二者均采用新型保护原理 适配低频系统故障特征。然而,低频系统中相量差 动保护灵敏度不足主要受低频系统控制作用影响, 通过优化控制策略提升保护灵敏度的路线更具针 对性及工程应用价值。

在低频系统故障控制策略方面,研究多以故障 期间功率模块及系统安全为目标^[19-25]。文献[19] 将低频功率中直流不均衡分量抑制为0得到负序 电流参考值,实现故障期间模块电容电压均衡。文 献[20]通过负序电流抑制及动态调压策略解决故 障期间功率器件过压、过流问题。文献[21]通过降 低 M3C 低频侧交流电压指令,迫使风电场进入低 穿过程,从而实现电网故障期间的安全穿越。目前 针对提高相量差动保护灵敏度的控制策略研究还 有欠缺。

为此, 文中先分析双端低频输电系统中低频线 路故障特征, 研究 M3C 控制策略对相量差动保护 灵敏度的影响; 再提出一种故障控制策略, 通过抑制 功率站正序电流输出显化故障特征, 增大故障差 流, 进而提高保护灵敏度; 最后, 基于某低频工程搭 建实时数字仿真(real-time digital simulator, RTDS)模 型, 对所提策略的有效性开展仿真验证。

1 柔性低频输电系统结构及原理

基于 M3C 的双端柔性低频输电系统结构见

160

图 1。工频侧系统频率为 50 Hz,低频侧系统频率 为 20 Hz。2 个换频站低频侧分别采用电压/频率 (V/F)控制模式和有功/无功(P/Q)控制模式,其中 V/F站控制低频电压幅值和相位, P/Q站控制线路 潮流。



图 1 基于 M3C 的双端柔性低频输电系统 Fig.1 Two-terminal flexible low-frequency transmission system based on M3C

M3C 结构如图 2 所示,包含 9 个桥臂 B_{xy}(x=a, b,c; y=u,v,w),每个桥臂由多个全桥子模块级联后与 桥臂电抗器串接而成。从工频侧看, M3C 由 3 个星 型子换流器并接而成,分别为 au、bu、cu 桥臂组成 的子换流器 U, av、bv、cv 桥臂组成的子换流器 V 以及 aw、bw、cw 桥臂组成的子换流器 W。同 理,从低频侧看, M3C 也可分为 3 个子换流器,分别 为 au、av、aw 桥 臂 组 成 的 子 换 流 器 A, bu、bv、 bw 桥臂组成的子换流器 B 以及 cu、cv、cw 桥臂组 成的子换流器 C。u_s为工频侧电压; u_{lf}为低频侧电 压; i_{sa}、i_{sb}、i_{sc}为工频侧三相电流; i_{fu}、i_{ffw}为低频 侧三相电流; i_{xy}为桥臂B_{xy}的电流。



图 2 M3C 结构 Fig.2 Structure of M3C

在低频输电系统正常运行时,通过合理的控制 方法,功率可经 M3C 在 2 个工频系统间有效传输, 且工频侧电流不会流入低频侧,低频侧电流也不会 流入工频侧,即可以在工、低频侧实现功率的完全 解耦控制^[26]。文中研究低频侧控制策略。

V/F 站采用文献[27]中的控制策略,控制框图 如图 3 所示,该策略在低频侧采用 dq 坐标系下的 全序控制。内环电流参考值采用文献[28]中的限 幅策略,以避免低频线路不对称故障下 M3C 过

载。图 3 中, u_{ld}、u_{lq}、u^{ref}_{lq}分别为低频侧三相电 压 d、q 轴分量及其参考值; ω_{lf}为低频侧系统角 频率; C_{lf}为低频侧交流电容; i_{12d}、i_{12q}分别为低频 侧负载电流 d、q 轴分量; i_{1fd}、i_{1fg}、i^{ref}_{lfd}、i^{ref}_{lfg}分别为 M3C 低频出口处电流 d、q 轴分量及其参考值; L 为 低频侧桥臂电感; u^{ref}_{com,v}、u^{ref}_{com,w}分别为子换流 器 U、V、W 三相桥臂电压低频共模分量参考值; PI 为比例积分控制器。



图 3 V/F 站低频侧控制框图 Fig.3 Control diagram of V/F station at low-frequency side

P/Q 站采用文献[29]中的控制策略,控制框图 如图 4 所示。该策略在低频侧采用 dq 坐标系下的 双序控制,内环电流正序 d 轴分量控制低频有功功 率,正序 q 轴分量控制低频无功功率,负序 d、q 轴 分量参考值均为 0。内环电流参考值同样采取文献 [28]中的限幅策略,以避免低频线路不对称故障下 M3C 过载,进而提高系统的故障穿越能力。





图 4 中, P^{ref}_{If} 、P_{If}分别为 M3C 低频侧有功功率 的参考值和实际值, 二者差值经过外环控制器得到 内环电流正序 d 轴分量参考值 i^{ref}_{If} 、Q_{If}分别为 M3C 低频侧无功功率的参考值和实际值, 二者差值 经过外环控制器得到内环电流正序 q 轴分量参考 值 i^{ref}_{If,q+}; i_{If,q+} 公别为低频侧电流正序 d、q 轴分 量实际值; $i_{tf,d-}^{ref}$ 、 $i_{tf,q-}^{ref}$ 和 $i_{tf,d-}$ 、 $i_{tf,q-}$ 分别为低频侧电流 负序d、q轴分量参考值和实际值; $\theta_{pll,f}$ 为M3C低频 侧正序电压锁相环输出角度; $u_{tf,d+}$ 、 $u_{tf,q+}$ 和 $u_{tf,d-}$ 、 $u_{tf,q-}$ 分别为低频侧电压正序d、q轴和负序d、q轴 分量实际值; $u_{tf,y+}^{ref}$ 、 $u_{tf,y}^{ref}$ 分别为低频侧y相电压 正序、负序及整体参考值。

2 电流差动保护适应性分析

2.1 保护基本原理

常见的比率制动型电流差动保护动作判据[8]为:

$$\left|\dot{I}_{1\phi} + \dot{I}_{2\phi}\right| - K_{\text{res}} \left|\dot{I}_{1\phi} - \dot{I}_{2\phi}\right| \ge I_{\text{op0}}$$
 (1)

式中: $\dot{I}_{1\phi}$ 、 $\dot{I}_{2\phi}$ 为线路两端单相测量电流, ϕ =A,B, C表示三相; K_{res} 为制动系数,取值范围为 0~1; I_{ont} 为电流门槛值,很小。

对于短距离架空线,线路电容电流较小。忽略 线路电容时,差动电流等于故障点注入电流*İ*te:

$$\dot{I}_{1\phi} + \dot{I}_{2\phi} = \dot{I}_{f\phi}$$
 (2)

可见İ_{to}越小,差流越小,保护灵敏度越低。

2.2 保护适应性分析

双端柔性低频输电系统等效模型如图 5 所示。其中, V_{s1} 、 Z_{oc1} 、 Z_{t1} 分别为 V/F 站等效电源、等效阻抗和低频变压器阻抗; V_{s2} 、 Z_{oc2} 、 Z_{t2} 分别为 P/Q 站等效电源、等效阻抗和低频变压器阻抗; \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 和 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 分别为线路两侧测点电压和电流; Z_{line1} 、 Z_{line2} 为两段线路的阻抗。共设置 5 个故障点: F_1 、 F_5 为区外故障, F_2 、 F_4 为区内端点处故障, F_3 为区内线路中点故障。





对于单相接地故障,以F₃处A相接地(简称AG)故障为例,故障点满足:

$$\begin{cases} \dot{U}_{\rm fA} = 0\\ \dot{I}_{\rm fB} = \dot{I}_{\rm fC} = 0 \end{cases}$$
(3)

式中: *Ù*_{fA}为故障点故障相电压; *İ*_{fc}为故障点非 故障相的故障电流。

以A相序分量为基准,式(3)可表示为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{\rm fp} + \dot{U}_{\rm fn} + \dot{U}_{\rm f0} = 0\\ \dot{I}_{\rm fp} = \dot{I}_{\rm fn} = \dot{I}_{\rm f0} \end{cases} \tag{4}$$

式中: \dot{U}_{fp} 、 \dot{U}_{fn} 、 \dot{U}_{n} 分别为故障点正、负、零序电 压; \dot{I}_{fp} 、 \dot{I}_{fn} 、 \dot{I}_{n} 分别为故障点正、负、零序电流。

根据式(4)可得,故障下的序网络结构如图 6 所示,其中正、负、零序网络串接, \dot{I}_{1p} 、 \dot{I}_{1n} 、 \dot{I}_{10} 和 \dot{I}_{2p} 、 \dot{I}_{2n} 、 \dot{I}_{20} 分别为 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 的正、负、零序分量; \dot{I}_{s1p} 、 \dot{I}_{s1n} 分 别为 V/F 站低频侧输出的正、负序电流; \dot{I}_{s2p} 、 \dot{I}_{s2n} 分 别为 P/Q 站低频侧输出的正、负序电流; Z_{1p} 、 Z_{1n} 、 Z_{10} 分别为 V/F 站低频侧至故障点等效阻抗的正、 负、零序分量; Z_{2p} 、 Z_{2n} 、 Z_{20} 分别为 P/Q 站低频侧至 故障点等效阻抗的正、负、零序分量。



图 6 AG 故障下序网络结构 Fig.6 Sequence network structure under AG fault

负序网络中, P/Q 站采用负序抑制控制使负序 阻抗无穷大, \dot{I}_{s2n} 近似为 0, 故 $\dot{I}_{fn} = -\dot{I}_{s1n}$, 可得故障相 电流 \dot{I}_{fA} 为:

$$\dot{I}_{\rm fA} = -3\dot{I}_{\rm s1n} \tag{5}$$

正序网络中,可得故障相电流为:

$$\dot{I}_{fA} = -3(\dot{I}_{s1p} + \dot{I}_{s2p}) \tag{6}$$

V/F 站采用全序控制,故障期间*İ*_{slp}和*İ*_{sln}的大小 具有不确定性,但由式(5)和式(6)可知,二者满足:

$$\dot{I}_{s1n} - \dot{I}_{s1p} = \dot{I}_{s2p}$$
 (7)

在有功功率为1 p.u.(潮流方向为 V/F 站到 P/Q 站)、无功功率为0的工况下, F₃处发生 AG 故 障时线路两侧电流如图7所示。故障前, V/F 站低 频网侧电流*İ*₁和 P/Q 站低频网侧电流*İ*₂中仅有正序 电流,根据图5中电流定义正方向,则二者方向相 反。故障期间,*İ*₂中负序分量近似为0,正序分量达 到限幅值,较故障前略有增加;*İ*₁中正序分量达到限 幅值,较故障前略有增加,由式(7)可知,负序分量 近似为0。由式(5)可知,故障相电流*İ*₁很小,故障 期间线路两侧电流表现为穿越电流特性。

对于相间短路故障,以F₃处发生BC两相短路 (简称BC)故障为例,故障位置约束条件满足:





$$\begin{cases} \dot{U}_{\rm fB} = \dot{U}_{\rm fC} \\ \dot{I}_{\rm fB} = -\dot{I}_{\rm fC} \\ \dot{I}_{\rm fA} = 0 \end{cases}$$
(8)

式中: Ü_{fb}、Ü_{fc}为故障两相电压。

以A相序分量为基准,式(8)可表示为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{\rm fp} = \dot{U}_{\rm fn} \\ \dot{I}_{\rm fp} = -\dot{I}_{\rm fn} \\ \dot{I}_{\rm f0} = 0 \end{cases}$$
(9)

由式(9)可得 BC 故障下的序网络结构,如图 8 所示,其中正序网络和负序网络并接,无零序网络。



图 8 BC 故障下序网络结构 Fig.8 Sequence network structure under BC fault

以B相为例,故障相电流为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{\rm fB} = -j \sqrt{3} \dot{I}_{\rm s1n} \\ \dot{I}_{\rm fB} = j \sqrt{3} (\dot{I}_{\rm s1p} + \dot{I}_{\rm s2p}) \end{cases}$$
(10)

则有:

$$-\dot{I}_{s1n} - \dot{I}_{s1p} = \dot{I}_{s2p} \tag{11}$$

在有功功率为1 p.u.、无功功率为0 的工况下, F₃处发生 BC 故障时线路两侧电流如图9 所示。故 障期间, P/Q 站低频网侧电流1₂中负序分量近似为 0, 正序分量达到限幅值, 较故障前略有增加; V/F 站 低频网侧电流1₁中正序分量达到限幅值, 较故障前 略有增加,由式(11)可知,负序分量近似为0。由式 (10)和式(8)可知,故障相电流 *İ*_B、*İ*_c很小,故障期 间线路两侧电流表现为穿越电流特性。



Fig.9 Currents on both sides of the line during the BC fault

参考文献[8]中方法,为分析比率制动型电流 差动保护的动作特性,定义 $K = |\dot{I}_{1\phi} + \dot{I}_{2\phi}| / |\dot{I}_{1\phi} - \dot{I}_{2\phi}|$ 。 区内故障时,K值应大于 K_{res} ,保护才可能正确动 作。根据图 7 和图 9 中数据,计算 AG 和 BC 故障 下K值随时间的变化趋势,如图 10 所示。



图 10 AG 和 BC 故障下的 K 值 Fig.10 K values under AG and BC faults

由图 10 可知, 在故障初期, 受 M3C 响应速度 影响, K短期内升至较高值。对于 AG 故障, K值最 大在 0.7 左右, 存在保护正确动作的可能性, 但受控 制器性能影响大, 可靠性较差; 对于 BC 故障, K值 最大在 0.4 左右, 难以通过整定 K_{res}使保护正确动 作。故障后期控制稳定时, AG 故障的 K值维持在 0.2 左右, BC 故障的 K 值维持在 0.1 左右, 难以通过 整定 K_{res}使保护正确动作。

对于两相接地和三相短路故障,由文献[8]中 的分析可知,2种故障类型下相量差动保护的灵敏 度均高于两相短路故障下的保护灵敏度,因此不再 详细分析其保护适应性。

3 故障控制策略

由上述分析可知,故障期间,P/Q站采用负序电

流抑制策略会抑制故障电流,使得故障点两侧电流 表现为穿越电流特性,电流差动保护灵敏度下降, 甚至可能拒动。

故障期间, P/Q 站维持一定的负序电流输出,将 有利于提高差动保护的灵敏度。但内环负序电流 参考值的选取难度较大,参考值较小时对差动保护 灵敏度的提升有限,参考值较大时 M3C 可能存在 过载风险。由式(6)和式(10)可知,抑制故障期间 P/Q 站正序电流输出,可显著增大故障电流,进而增 大故障差流,提高保护灵敏度。策略优化后的控制 框图如图 11 所示。



图 11 文中控制的控制框图 Fig.11 Control diagram of the proposed control

图 11 中, 内环电流正序 q 轴分量参考值 i^{ref}_{If,q+} 控制为 0; 未限幅参考值 i^{ref}_{exlf,d+}经比较限幅环节得到内环电流正序 d 轴分量参考值 i^{ref}_{If,d+}, 二者关系如下:

$$i_{\mathrm{lf},d+}^{\mathrm{ref}} = \begin{cases} \max\left(k_{1}i_{\mathrm{exlf},d+}^{\mathrm{ref}},k_{2}\right) & i_{\mathrm{exlf},d+}^{\mathrm{ref}} \ge 0\\ \min\left(k_{1}i_{\mathrm{exlf},d+}^{\mathrm{ref}},-k_{2}\right) & i_{\mathrm{exlf},d+}^{\mathrm{ref}} < 0 \end{cases}$$
(12)

其中, k₁参数与线路差动保护的制动系数定值 配合, k₁取值越小, 故障差流越大, 差动保护灵敏度 越高, 但应保持正值, 降低故障期间功率反向的风 险; k₂参数与 P/Q 站断路器失灵保护的定值配合, 确 保故障期间 P/Q 站低频网侧断路器流经一定的故 障电流, 满足失灵保护有流判据。工程应用时, k₁和 k₂参数可配合线路差动保护和断路器失灵保护定值 灵活调整。文中k₁、k₂均取 0.2。

为表明文中控制的优势及局限性,选取文献 [19]中的故障穿越策略作为对比控制进行分析。 该策略将低频有功功率中不均衡直流分量抑制为 0以确定负序电流参考值,控制框图如图 12 所示。

文中控制和对比控制均采用与第1章中原始 控制相同的内环电流参考值限幅策略。



图 12 对比控制的控制框图



4 仿真分析

4.1 仿真模型及参数

基于实际柔性低频输电工程搭建 RTDS 模型, 仿真系统结构如图 1 所示, 仿真参数如表 1 所示。 在 100 ms 时发生故障, 故障持续 400 ms。

表 1 M3C 参数 Table 1 Parameters of M3C

参数	数值	参数	数值
额定容量/(MV·A)	330	低频频率/Hz	20
工频网侧电压/kV	230	桥臂模组数目	64
工频阀侧电压/kV	64	桥臂电感/mH	7
低频网侧电压/kV	230	模块电容/mF	14
低频阀侧电压/kV	64	额定电容电压/V	2 150
工频频率/Hz	50	线路长度/km	13.025

4.2 仿真结果及分析

仿真中,原始控制、文中控制和对比控制均采 用 4.1 节中的系统参数,仅在控制策略上有差异。

在有功功率为1 p.u.、无功功率为0 的工况下, F₃处发生 AG 故障时文中控制和对比控制的仿真 波形如图 13、图 14 所示, BC 故障时文中控制和对 比控制的仿真波形如图 15、图 16 所示。

由图 13 和图 15 可知,采用文中控制时,故障期间的 P/Q 站低频网侧电流幅值低于正常运行时的电流幅值,M3C 无过载风险,且由式(7)和式(11)可知,P/Q 站抑制正序电流输出,使得 V/F 站输出较大的负序电流,从而增大了故障电流,提高了保护灵敏度。由图 14 和图 16 可知,采用对比控制时,故障期间的 P/Q 站低频网侧故障相电流幅值较正常运行时有明显升高,P/Q 站输出较大负序电流,增大了故障电流,提高了保护灵敏度。

上述波形对应的K值曲线如图 17 所示。对比



图 13 AG 故障时线路两侧电流(文中控制)

Fig.13 Currents on both sides of the line during the AG fault (the proposed control)

















图 17 和图 10 可知, 文中提出的正序电流抑制控制 策略和对比控制策略均能显著提高故障期间差动 电流与制动电流比值, 且文中控制策略提升效果更 好, 通过整定*K*_{res}存在保护正确动作的可能性。



图 17 文中控制及对比控制在 AG 和 BC 故障下的 K 值 Fig.17 K values of the proposed control and the contrastive control under AG and BC faults

为验证文中控制策略在不同工况下的控制效 果,在有功功率为-1 p.u.或 0、无功功率为 0 的工况 下,对原始控制、文中控制及对比控制策略开展仿 真, K值曲线如图 18 所示。由图 18(a)可知,在反 向(潮流方向为 P/Q 站到 V/F 站)满有功功率运行 的工况下,文中控制策略可显著提升相量差动保护 灵敏度。由图 18(b)可知,在零功率运行工况下,文 中控制降低了相量差动保护灵敏度,K值大小与 图 17 所示正向满有功功率运行工况接近。

在有功功率为1p.u.、无功功率为0的工况下,图5 中*F*₁、*F*₂、*F*₄、*F*₅故障时的仿真结果见图19。

对比图 19 中 F₁、F₂及 F₄、F₅故障时的仿真结 果可知,文中控制策略下,区内故障和区外故障的 K 值存在显著差异,因此通过整定K_{res}可以正确区 分区内、外故障。对比图 19 中 F₂、F₄及图 17 所示 F₃故障时的仿真结果可知,区内不同故障位置下



AG 和 BC 故障下的 K 值



*K*值差异较小,因此在区内故障时文中控制效果受故障位置影响较小。

在有功功率为1 p.u.、无功功率为0 的工况下, F₃ 经低、中、高过渡电阻发生 AG、BC、两相接地 (简称 BCG)和三相短路(简称 ABC)故障时的仿真 结果如图 20 所示。仿真结果表明,文中控制策略





下,相量差动保护在低、中过渡电阻下有良好的适 应性,在高过渡电阻下灵敏度有所降低;相同过渡 电阻下,单相接地、两相接地和三相短路故障下的 相量差动保护灵敏度高于两相短路故障。



5 结论

文中分析了双端低频输电系统中 M3C 控制对 相量差动保护灵敏度的影响,针对单相接地和两相 短路故障下保护灵敏度不足问题,提出一种正序电 流抑制的故障控制策略,并建立 RTDS 模型进行仿 真验证,得出以下结论:

(1)低频线路区内发生单相接地和两相短路故障时,M3C采用负序电流抑制策略,将抑制故障特征,线路两侧电流幅值受限且基本对称,呈现穿越特性,相量差动保护灵敏度不足,存在拒动风险。

(2)故障期间 M3C 输出负序电流可有效提升 相量差动保护灵敏度,但也会增大故障电流幅值; 采取抑制正序电流的策略,可在提升保护灵敏度同 时,维持故障电流在较低水平。

(3) 正序电流抑制策略中控制目标值意义明确, 计算简单, 参数可灵活调整, 易与交流保护配合; 仿真表明在典型工况、不同故障类型及低、中过渡电阻下保护灵敏度都在理想范围, 具有较好的工程应用价值和一定的推广价值。

参考文献:

[1] 段子越, 孟永庆, 宁联辉, 等. 柔性分频输电系统的构建规划及
 关键设备技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 205-215.

DUAN Ziyue, MENG Yongqing, NING Lianhui, et al. Review on construction planning and key equipment technology of flexible fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 205-215.

- [2] 赵国亮,陈维江,邓占锋,等. 柔性低频交流输电关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 1-10.
 ZHAO Guoliang, CHEN Weijiang, DENG Zhanfeng, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 1-10.
- [3] 林进钿, 倪晓军, 裘鹏. 柔性低频交流输电技术研究综述[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 42-50.

LIN Jintian, NI Xiaojun, QIU Peng. Review of flexible low-frequency AC transmission technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 42-50.

- [4] 王秀丽,张小亮,宁联辉,等. 分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 15-19.
 WANG Xiuli, ZHANG Xiaoliang, NING Lianhui, et al. Application prospects and challenges of fractional frequency transmission system in offshore wind power integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 15-19.
- [5] 张树楠, 任军辉, 宋志顺, 等. 基于 M3C 的柔性低频输电系统 启动控制策略研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 201-209.

ZHANG Shunan, REN Junhui, SONG Zhishun, et al. Research on startup control strategy of flexible low-frequency transmission system based on M3C[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 201-209.

- [6] 彭发喜,陈建福,袁智勇,等.海上风电柔性低频输电动模平台设计[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(5):108-116.
 PENG Faxi, CHEN Jianfu, YUAN Zhiyong, et al. Design of dynamic model platform for offshore wind farm interconnection via flexible low-frequency AC transmission system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 108-116.
- [7] 黄涛,谢华,徐晓春,等.对称故障下变流器控制对差动保护影响及优化策略[J].中国电机工程学报,2024,44(13):5063-5073.

HUANG Tao, XIE Hua, XU Xiaochun, et al. Influence of converter control on differential protection under symmetric fault and optimization strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5063-5073.

[8] 蒋嘉桁,张晨浩,宋国兵,等.电流差动保护在海上风电低频送出线路中的适应性分析[J].电力系统自动化,2024,48(1):131-139.

JIANG Jiaheng, ZHANG Chenhao, SONG Guobing, et al. Adaptability analysis of current differential protection in lowfrequency transmission lines of offshore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 131-139.

[9] 赖逸洋,王增平,王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网 中适应性分析及改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023,51(3):145-154.

LAI Yiyang, WANG Zengping, WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 145-154.

[10] 郑黎明, 贾科, 毕天妹, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故 障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20-32.

ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32.

- [11] 程骁, 顾乔根, 任旭超, 等. 海上风电柔性直流输电换流变差 动保护的适应性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 8-18. CHENG Xiao, GU Qiaogen, REN Xuchao, et al. Adaptability analysis on differential protection of converter transformers in a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 8-18.
- [12] 梁营玉,李武林,卢正杰,等. MMC-HVDC 对交流线路电流 相位差动保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9):95-101.

LIANG Yingyu, LI Wulin, LU Zhengjie, et al. Influence of

MMC-HVDC on current phase differential protection of AC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 95-101.

[13] 王秀莲, 崔云龙, 胡广. 光伏并网系统送出线路不对称故障的 差动保护灵敏度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 20-26.

WANG Xiulian, CUI Yunlong, HU Guang. Sensitivity studies on differential protection during the output line of gridconnected photovoltaic systems occur asymmetrical faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 20-26.

[14] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场 站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 100-105.

LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105.

[15] 薛明军,陈福锋,杨林刚,等.海上风电交流送出线路继电保 护优化设计[J].电力系统保护与控制,2023,51(20):150-159.

XUE Mingjun, CHEN Fufeng, YANG Lingang, et al. Optimized design of relay protection for an offshore wind power outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 150-159.

- [16] 瞿继平, 吴兴全, 闫凯, 等. 光伏电站弱电源特性对送出线路 继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 146-151.
 QU Jiping, WU Xingquan, YAN Kai, et al. Influence of PV station weak power feature on relay protection of outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 146-151.
- [17] 潘武略, 钱政旭, 孙志攀, 等. 基于采样值差动原理的低频输 电线路差动保护研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(2): 35-42.
 PAN Wulue, QIAN Zhengxu, SUN Zhipan, et al. Research on differential protection of low frequency transmission lines based on differential principle of sampling values[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(2): 35-42.
- [18] 何维轩, 樊征臻, 霍姚彤, 等. 基于交叉熵的海上风电经柔性 低频送出系统海缆纵联保护[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 38-48.

HE Weixuan, FAN Zhengzhen, HUO Yaotong, et al. Pilot protection scheme of submarine cable in flexible low-frequency transmission system based on cross entropy algorithm[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 38-48.

[19] 郑涛,宋伟男,吕文轩. 基于 M3C 的低频输电系统不对称故 障穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(8): 107-117.

ZHENG Tao, SONG Weinan, LÜ Wenxuan. Asymmetric fault ride-through control strategy for a low frequency AC transmis-

sion system based on a modular multilevel matrix converter [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 107-117.

[20] 高校平,张晨浩,宋国兵,等.海上风电低频输电系统低频侧 不对称故障控制策略[J].电力自动化设备,2023,43(10): 160-166.

GAO Xiaoping, ZHANG Chenhao, SONG Guobing, et al. Control strategies of offshore wind power low frequency transmission system under asymmetric fault of low-frequency side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 160-166.

[21] 孙玉巍,王童,付超,等.适用于海上风电分频输电的模块化 多电平矩阵变换器故障穿越控制策略[J].高电压技术, 2023,49(1):19-30.

SUN Yuwei, WANG Tong, FU Chao, et al. Fault ride-through control strategy of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 19-30.

- [22] 朱海勇, 吴小丹, 王宇, 等. 风电机组经低频输电系统并网的 故障穿越协调控制[J]. 供用电, 2022, 39(11): 11-17, 31.
 ZHU Haiyong, WU Xiaodan, WANG Yu, et al. A coordinated fault ride-through control for wind turbine through LFTS[J].
 Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 11-17, 31.
- [23] 赵勃扬, 王锡凡, 宁联辉, 等. 分频海上风电系统的不对称故 障穿越控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4589-4600.

ZHAO Boyang, WANG Xifan, NING Lianhui, et al. Ridethrough control of fractional frequency offshore wind power system during unsymmetrical grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4589-4600.

- [24] LIU S Q, SAEEDIFARD M, WANG X F. Analysis and control of the modular multilevel matrix converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1979-1989.
- [25] 郑涛,康恒,宋伟男.可实现低频输电系统不对称故障穿越的 M3C 电容电压均衡控制策略[J].电力系统保护与控制, 2023,51(23):130-140.

ZHENG Tao, KANG Heng, SONG Weinan. Asymmetric fault ride-through control strategy for low-frequency transmission systems realizing the capacitor voltage balance of modular multilevel matrix converters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 130-140.

 [26] 吴小丹,李建春,董云龙,等. 面向低频海上风电送出的模块 化多电平矩阵变换器综合解耦控制策略[J]. 中国电机工程 学报, 2023, 43(8): 3177-3190.
 WU Xiaodan, LI Jianchun, DONG Yunlong, et al. Comprehen-

sive decoupling control strategy for modular multilevel matrix converter for low frequency offshore wind power transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3177-3190.

[27] 吴小丹. 面向低频海上风电送出的模块化多电平矩阵变换器

输入输出侧解耦控制[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2909-2923. WU Xiaodan. Input/output side decoupling control of modular multilevel matrix converter for low-frequency offshore wind power transmission[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2909-2923.

- [28] 徐政,张哲任. 低频输电技术原理之三: M³C 基本控制策略 与子模块电压平衡控制[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 30-41. XU Zheng, ZHANG Zheren. Principles of low frequency power transmission technology: part 3-basic control strategy for the M³C and sub-module voltage balance control[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 30-41.
- [29] 陆立文,吴小丹,周前,等.双端柔性低频输电系统无扰动并 网控制策略[J].电力工程技术,2022,41(5):31-39.

LU Liwen, WU Xiaodan, ZHOU Qian, et al. Undisturbed grid connection control strategy for two-terminal flexible lowfrequency transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 31-39.

作者简介:



史艳刚(1992), 男, 硕士, 工程师, 从事柔性 交 直 流 系 统 控 制 保 护 技 术 工 作(E-mail: shiyg@nrec.com);

朱海勇(1991),男,硕士,从事柔性直流输 电系统及应用、柔性低频输电系统等工作; 陆立文(1990),男,硕士,工程师,从事柔性 交直流系统技术工作。

Influence of low-frequency transmission system control on differential protection and optimization strategy

SHI Yangang¹, ZHU Haiyong¹, LU Liwen¹, LU Yi², QIU Defeng¹, LIN Yizhe¹
(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310000, China)

Abstract: As a fault occurs on lines of a two-terminal low-frequency transmission system, fault currents will be suppressed when frequency converters adopt negative sequence current suppression strategy. Under such a circumstance, currents on both sides of the line show weak feed and traversal characteristics, leading to poor sensitivity or even failure to operate of the traditional phase-based line differential protection. To solve the above problem, the two-terminal low-frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter (M3C) topology is constructed. And the fault electrical characteristics and phasor differential protection adaptability of single-phase grounding and two-phase short-circuit faults of low-frequency lines are analyzed. Then, a fault control strategy is proposed to highlight fault characteristics by suppressing the positive sequence current output of the power control station, thereby improving the braking characteristics and sensitivity of differential protection. Finally, a real-time digital simulator (RTDS) model is built based on a low-frequency transmission project, and the proposed control strategy is simulated and verified against typical faults. The results show that the proposed fault control strategy can effectively solve the problem of insufficient sensitivity of phasor differential protection for low-frequency line fault, being of well value in engineering application.

Keywords: modular multilevel matrix converter (M3C); low-frequency transmission system; positive sequence current suppression strategy; fault characteristics of low-frequency line; low-frequency line protection; phasor differential protection

(编辑 陆海霞)