文章编号：1674-2974（2026）02-0182-11 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026167

适用于海上风电低频输电线路的纵联保护方案

高淑萍[1,4]，周永宁[1,4†]，王晨清[1,2]，宋国兵[3]，周晋宇[1,4]，张警行[1,4]
（1. 西安科技大学 电气与控制工程学院，陕西 西安 710054；
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，江苏 南京 211103；
3. 西安交通大学 电气工程学院，陕西 西安 710049；
4. 西安市电气设备状态监测与供电安全重点实验室，陕西 西安 710054）

摘 要：海上风电低频输电线路故障后，其双侧换流器的控制策略将会影响故障特征，这使得传统电流差动保护将面临灵敏度下降甚至拒动的风险．针对这一问题，首先基于参数识别的思想，分析低频线路发生区内、区外故障时的拓扑的差异．其次对电容模型误差进行改进，将改进后的电容模型和阻感模型进行对比，构建了利用综合模型误差的纵联保护方案．最后，在PSCAD/EMTDC中搭建海上风电低频输电系统模型，对保护方案进行验证．仿真结果表明：所提方案能够快速、可靠地识别出故障，具有良好的耐过渡电阻、抗噪声和抗干扰能力，且受换流器控制策略及采样频率影响较小．

关键词：海上风电；低频输电系统；模型识别；模型误差；线路保护
中图分类号：TM773 **文献标志码**：A

Pilot protection method applicable for low-frequency transmission lines of offshore wind power

GAO Shuping[1,4]，ZHOU Yongning[1,4†]，WANG Chenqing[1,2]，SONG Guobing[3]，
ZHOU Jinyu[1,4]，ZHANG Jingxing[1,4]
（1. College of Electrical and Control Engineering，Xi'an University of Science and Technology，Xi'an 710054，China；
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co.，Ltd. Research Institute，Nanjing 211103，China；
3. School of Electrical Engineering，Xi'an Jiaotong University，Xi'an 710049，China；
4. Xi'an Key Laboratory of Electrical Equipment Condition Monitoring and Power Supply Security，Xi'an 710054，China）

Abstract：When the low-frequency transmission line of offshore wind power fails，the control strategy of its double-side converter affects the fault characteristics，which makes the traditional current differential protection face the risk of sensitivity decline or rejection. To solve this problem，firstly，based on parameter identification，the topological differences of the low-frequency line during the occurrence of internal and external faults are analyzed. Secondly，the capacitance model error is improved，the improved capacitance model is compared with the resistance

* **收稿日期**：2025-01-03
基金项目：陕西省自然科学基金资助项目（2024JC-YBMS-792），Natural Science Foundation Project of Shaanxi Province（2024JC-YBMS-792）；国家电网有限公司总部科技项目资助（52094020006U），Headquarters Science and Technology Project of State Grid Corporation of China（52094020006U）；国家自然科学基金国际合作与交流项目资助（52061635105），International Cooperation and Exchange Program of the National Natural Science Foundation of China（520616 35105）
作者简介：高淑萍（1970—），女，河南新乡人，西安科技大学副教授，博士
† 通信联系人，E-mail：909528495@qq.com

model, and the pilot protection scheme using the comprehensive model error is constructed. Finally, the low-frequency transmission system model of offshore wind power is built in PSCAD/EMTDC to verify the protection scheme. Simulation results show that the proposed scheme can identify faults quickly and reliably, has good transition resistance, anti-noise, and anti-interference capabilities, and is less affected by converter control strategy and sampling frequency.

Key words: offshore wind power; low-frequency transmission system; model recognition; model error; line protection

面对化石能源即将枯竭的窘境,以可再生能源为代表的新能源产业的开发和利用变成当前研究的热潮.风力发电作为新能源发电的重要组成部分,在新能源产业中的渗透率不断提高.与陆上风电相比,海上风电凭借风力资源丰富、占地较小、靠近负荷中心等优势,在未来拥有光明的应用前景.同时,海上风电低频输电系统(low-frequency transmission system, LFTS)在中远海风电并网场景中优势突出[1-2].海上风电低频输电工程在浙江投入商业运营,标志着海上风电进入新时代[3].

电流差动保护原理简单、应用广泛,常作为输电线路的主保护.但低频输电线路双侧换流器均为电力电子器件,故障电流呈现一定的穿越特性,使得电流差动保护的性能大幅度下降[4].文献[5-6]对于低频线路的电流差动保护进行了优化,但实际低频相量的提取数据窗较长,影响保护的速动性.风电系统呈现时变和非线性特征,使得基于故障分量的保护元件也会面临失效风险[7].目前,针对低频输电系统的研究多集中在换流器的控制上,对于保护新原理的研究正处于起步阶段[8-11].文献[12]利用故障后双端电流差异,提出基于Mann-Kendall检验法的保护方法.文献[13]通过构建双端保护安装处电流Hankel矩阵,利用奇异值差异来识别区内、区外故障.文献[14]将电流构造Toeplitz矩阵,利用矩阵梯度构建保护判据.上述保护均利用故障电流的本征响应特征,但随着换流器的启动速度变快,本征响应时间缩短,保护方法性能下降.

鉴于上述原因,有必要研究利用时域信息且不受换流器控制策略影响的LFTS线路的保护方法.行波保护虽不受换流器控制策略影响,但抗噪声、过渡电阻能力较差[15-16].近年来,有学者提出基于模型识别的保护思想,模型识别的本质是不同故障位置下元件拓扑的改变,不受电源特性影响.目前利用模型差异构建的保护方法可分为模型符合度[17-18]和模型误差[19-21].然而,基于模型符合度的保护方法在面临区内中点经高阻接地时,保护可靠性大幅下降.模型误差法则多采用模量构建保护,无法识别故障相.

本文首先分析了低频输电系统双侧换流器的控制策略及电流差动保护的适应性.其次通过构建区内、区外故障网络,得到故障等值模型.然后构造阻感模型和改进电容模型的误差函数,通过计算阻感模型和电容模型误差大小来区分故障位置.最后,在PSCAD/EMTDC软件中建立仿真模型,验证保护方法的优越性.

1　换流器故障特征及电流差动保护适应性分析

1.1　系统拓扑

LFTS拓扑结构如图1所示,海上风电场采用直驱式永磁同步风力发电机组(permanent magnet synchronous generator, PMSG),其换流器是全功率型.M3C(modular multilevel matrix converter, M3C)安装于陆地,可将低频电流换为工频后并至电网.图1中几个典型的故障位置:f_1为区外靠近风电场的故障、f_2为区内距离母线W长10 km处的故障、f_3为区内中点的故障、f_4为区内距离母线M长10 km处的故障、f_5为区外靠近M3C的故障.

1.2　换流器故障特征

当LFTS发生故障时,PMSG采用低电压穿越策略,向系统注入正序无功电流,为保证电力电子器件

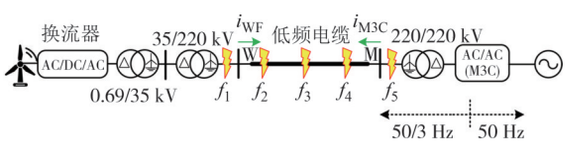


图1　LFTS拓扑结构

Fig.1　Topology of LFTS

可以正常工作,常对负序电流进行抑制.此时风电场的动态电流为[22]

$$\begin{cases} i^*_{\mathrm{wq}+} = k^+(0.9 - u^+_{\mathrm{pcc}}) \ , \ 0.2 \leqslant u^+_{\mathrm{pcc}} \leqslant 0.9 \\ i^*_{\mathrm{wd}+} = \min\left(\dfrac{p}{u^+_{\mathrm{pcc}}}, \sqrt{i^2_{\max} - (i^*_{\mathrm{wq}+})^2}\right) \\ i^*_{\mathrm{wq}-} = i^*_{\mathrm{wd}-} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中:$i^*_{\mathrm{wd}+}$、$i^*_{\mathrm{wq}+}$分别为有功、无功电流的正序参考值;p为风机有功输出的额定值;k^+为无功电流比例系数;$i_{\max}$取风机换流器电流幅值;u^+_{pcc}为并网点正序电压幅值.由于风机采取负序电流抑制策略,故负序有功、无功电流参考值$i^*_{\mathrm{wd}-}$、$i^*_{\mathrm{wq}-}$为0.

由式(1)可得,随着u^+_{pcc}的减小,有功电流逐渐减小,无功电流增大,风电场呈现受控电流源的特性.

M3C采取双dq变换将工频侧和低频侧解耦,发生不对称故障时对于低频侧的负序电流进行抑制.此时M3C的动态电流为[23]

$$i_{\mathrm{M3C}} = \sqrt{(i^*_{\mathrm{d}+})^2 + (i^*_{\mathrm{q}+})^2} \tag{2}$$

式中:$i^*_{\mathrm{d}+}$、$i^*_{\mathrm{q}+}$分别为M3C低频侧电流的正序有功、无功参考值.

由于海上风电场的弱电网特性,需要M3C为其提供稳定交流电压支撑.为保证故障后M3C能正常运行,采用*v/f*动态降压作为外环控制策略对M3C的正序电流进行调节[24],如图2所示,故可以将M3C等效为受控电压源.

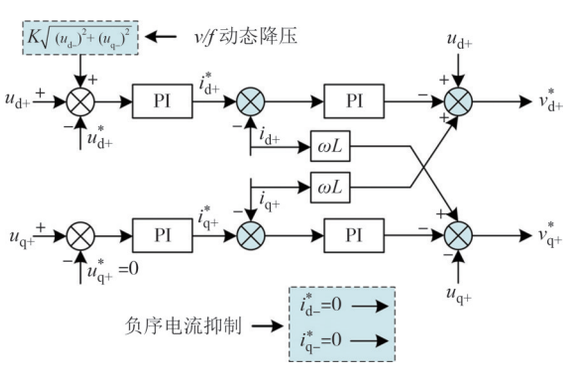


图2 M3C控制策略

Fig.2 Control strategy of M3C

由式(1)和式(2)可得,低频输电线路的故障特征受控于换流器控制策略,这将使得故障特征迥异于传统同步电源,需分析在此情况下电流差动保护的适应性.

1.3 电流差动保护适应性分析

电流差动保护基于基尔霍夫电流定律,原理简单,具有天然的选相能力[25].保护的动作判据为

$$\begin{cases} I_{\mathrm{cd}} > K_{\mathrm{res}} I_{\mathrm{zd}} \\ I_{\mathrm{cd}} > I_{\mathrm{op}} \end{cases} \tag{3}$$

式中:$I_{\mathrm{cd}} = \left|\dot{I}_{\mathrm{WF}} + \dot{I}_{\mathrm{M3C}}\right|$和$I_{\mathrm{zd}} = \left|\dot{I}_{\mathrm{WF}} - \dot{I}_{\mathrm{M3C}}\right|$分别为差动电流、制动电流;$K_{\mathrm{res}}$为制动系数,一般取值0.5~0.8;$I_{\mathrm{op}}$为启动值,数值很小,本文取$0.1I_{\mathrm{N}}$,$I_{\mathrm{N}}$为系统的额定电流[26].

以单相接地为例分析电流差动保护的适应性,低频输电线路区内发生单相接地时的复合序网如图3所示.图中:变量上标+、-、0分别对应正、负、零序分量;Z_{WF}表示风机等值阻抗;Z_{M3C}表示M3C换流器等值阻抗;R_{f}表示过渡电阻;Z_{W}、Z_{M}分别表示故障点距离W和M端的线路等值阻抗;$\dot{I}_{\mathrm{WF}}$表示风电场并网点的输出电流;$\dot{U}_{\mathrm{M3C}}$和$\dot{I}_{\mathrm{M3C}}$分别表示M3C低频侧电压与电流;$\dot{U}_{\mathrm{f}}$和$\dot{I}_{\mathrm{f}}$分别表示故障点的电压与电流;负序网络因双侧换流器采取的负序电流抑制策略体现为开路.

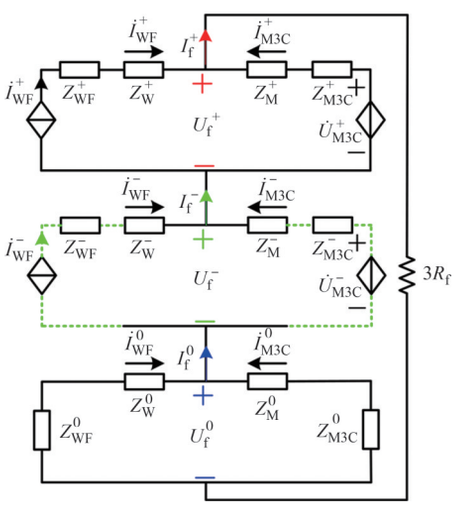


图3 单相接地时故障复合序网

Fig. 3 Composite sequence network diagram of single phase-to-ground fault

以发生A相接地故障为例,A相的差动电流和制动电流分别为

$$\begin{cases} I_{\mathrm{cd}} = \left|\dot{I}^+_{\mathrm{WF}} + \dot{I}^-_{\mathrm{WF}} + \dot{I}^0_{\mathrm{WF}} + \dot{I}^+_{\mathrm{M3C}} + \dot{I}^-_{\mathrm{M3C}} + \dot{I}^0_{\mathrm{M3C}}\right| \\ I_{\mathrm{zd}} = \left|\dot{I}^+_{\mathrm{WF}} + \dot{I}^-_{\mathrm{WF}} + \dot{I}^0_{\mathrm{WF}} - \dot{I}^+_{\mathrm{M3C}} - \dot{I}^-_{\mathrm{M3C}} - \dot{I}^0_{\mathrm{M3C}}\right| \end{cases} \tag{4}$$

式中:由于M3C的负序电流抑制,取$\dot{I}^-_{\mathrm{M3C}} = 0$.

同时根据故障复合序网:

$$\begin{cases} \dot{I}^+_{\mathrm{f}} = \dot{I}^+_{\mathrm{WF}} + \dot{I}^+_{\mathrm{M3C}} \\ \dot{I}^0_{\mathrm{f}} = \dfrac{\dot{U}^0_{\mathrm{f}}}{(Z^0_{\mathrm{W}} + Z^0_{\mathrm{WF}})//(Z^0_{\mathrm{M}} + Z^0_{\mathrm{M3C}})} \\ \dot{I}^-_{\mathrm{f}} = \dot{I}^-_{\mathrm{WF}} + \dot{I}^-_{\mathrm{M3C}} = 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中://表示故障点两侧的等值阻抗.

将式(5)代入式(4)再进行相序变换,可得

$$I_{cd}=\left|3\dot{I}^{-}_{WF}\right| \tag{6}$$

由式(6)得,当M3C采取负序电流抑制时差动电流由风机侧的负序电流提供.当风机侧也采取负序电流抑制策略时,$I_{cd}=0$.此时差动电流值为0,保护理论上拒动.

同理,相间故障时负序网络和正序网络并联,$I^{+}_{f}=I^{-}_{f}$,此时故障电流仍呈现穿越特性.线路区内发生BC相间故障时,以A相为基准相的故障复合序网如图4所示.B相的差动电流和制动电流为

$$\begin{cases} I_{cd}=\left|a^2\left(\dot{I}^{+}_{WF}+\dot{I}^{+}_{M3C}\right)+a\left(\dot{I}^{-}_{WF}+\dot{I}^{-}_{M3C}\right)\right| \\ I_{zd}=\left|a^2\left(\dot{I}^{+}_{WF}-\dot{I}^{+}_{M3C}\right)+a\left(\dot{I}^{-}_{WF}-\dot{I}^{-}_{M3C}\right)\right| \end{cases} \tag{7}$$

式中:a为旋转因子,$a=e^{j120^{\circ}}$.

图4中,依照基尔霍夫电流定律,有

$$\dot{I}^{+}_{WF}+\dot{I}^{+}_{M3C}=-\dot{I}^{-}_{WF} \tag{8}$$

将式(8)带回式(7)可得

$$I_{cd}=\left|\left(a-a^2\right)\dot{I}^{-}_{WF}\right| \tag{9}$$

由式(9)可得,同A相接地故障情况一致,差动电流值为0,保护理论上拒动.

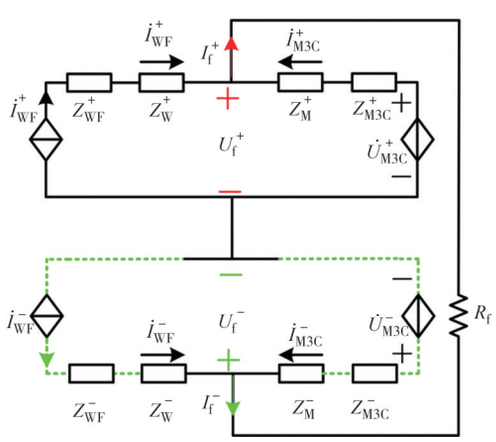


图4　两相相间故障复合序网

Fig.4　Composite sequence circuits of phase-to-phase fault

综上所述,电流差动保护在出现单相接地和相间故障时将面临灵敏度下降甚至拒动风险.因此,关于双侧均为电力电子换流器的线路应尽量寻求不受电源特性影响的保护方法.

2　故障模型分析

故障的本质是被保护对象拓扑及参数的改变.本节通过分析区内、区外故障网络的差异,定义不同的故障模型,为后续保护方法的提出提供理论基础.

2.1　区内故障模型

以单相线路为例进行分析.图5为含双端电源的海上风电低频电缆WM发生区内故障时的等效网络,低频电缆采用π模型.

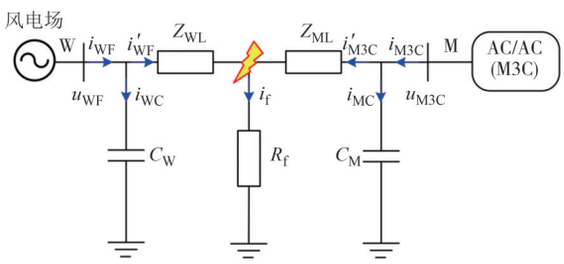


图5　区内故障等效网络

Fig.5　Internal fault equivalent network

图5中,$Z_{WL}=R_w+j\omega L_w$、C_W表示低频线路W侧等值阻抗与对地电容;$Z_{ML}=R_m+j\omega L_m$、C_M表示低频线路M侧等值阻抗与对地电容;R_f为过渡电阻;u_{WF}、i_{WF},u_{M3C}、i_{M3C}分别为两侧保护安装的电压、电流,i_{WC}、i_{MC},i_f分别为双侧对地电容的电流和流入故障点电流;i'_{WF}、i'_{M3C}分别为风机、M3C侧流过线路等值阻抗上的电流,其值为各自保护安装处电流减去对地电容电流.

由图5可知,线路两端的测量电压满足:

$$\begin{cases} u_{WF}=R_f i_f+R_w i'_{WF}+L_w\dfrac{\mathrm{d}(i'_{WF})}{\mathrm{d}t} \\ u_{M3C}=R_f i_f+R_m i'_{M3C}+L_m\dfrac{\mathrm{d}(i'_{M3C})}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{10}$$

式中:流过低频电缆的电容电流可以近似忽略[27],此时有$i_{WF}\approx i'_{WF}$,$i_{M3C}\approx i'_{M3C}$.

定义差动电压、差动电流分别为u_{cd}、i_{cd},则有$u_{cd}=u_{WF}+u_{M3C}$,$i_{cd}=i_{WF}+i_{M3C}$.由式(3)和式(10)可得

$$\begin{aligned} u_{cd}=&k_w R_w i_{cd}+k_m R_m i_{cd}+\\ &k_w L_w\frac{\mathrm{d}(i_{cd})}{\mathrm{d}t}+k_m L_m\frac{\mathrm{d}(i_{cd})}{\mathrm{d}t}+2R_f i_f \end{aligned} \tag{11}$$

将式(11)进一步化简可得

$$u_{cd}=R' i_{cd}+L'\frac{\mathrm{d}(i_{cd})}{\mathrm{d}t} \tag{12}$$

式中:$R'=k_w R_w+k_m R_m+2R_f$;$L'=k_m L_m+k_w L_w$.

由式(12)可得,当发生区内故障时,差动电压和差动电流符合阻感模型.

2.2　区外故障模型

海上风电低频输电线路发生区外故障时等效网络如图6所示.图6中:Z_L、C分别表示低频线路等值阻抗与对地电容.

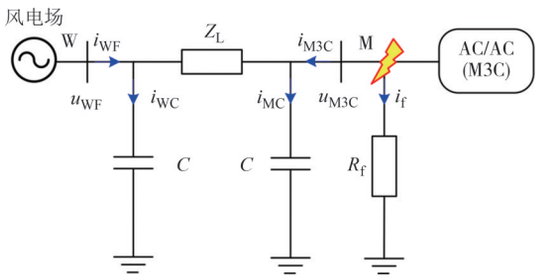


图6 区外故障等效网络

Fig.6 External fault equivalent network

图6中,低频线路两端的对地电容电流满足:

$$\begin{cases} i_{WC} = C\dfrac{\mathrm{d}(u_{WF})}{\mathrm{d}t} \\ i_{MC} = C\dfrac{\mathrm{d}(u_{M3C})}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{13}$$

根据基尔霍夫电流定律,有

$$i_{WC} + i_{MC} = i_{WF} + i_{M3C} = i_{cd} \tag{14}$$

此时,差动电压与差动电流满足:

$$i_{cd} = 2C\frac{\mathrm{d}(u_{cd})}{\mathrm{d}t} \tag{15}$$

由式(15)可得,当发生区外故障时,差动电压和差动电流可以等效为电容模型.

3 基于综合模型误差的保护方法

由第2节分析可知,当发生区外故障时,差动电流和差动电压满足电容模型,发生区内故障时满足阻感模型,可根据模型差异构成保护方法.

3.1 保护启动判据

纵联保护要求启动元件能够快速检测故障,本文采取电压突变量作为保护的启动判据:

$$\left|\Delta u_{\varphi}\right| > 0.1U_{set} \tag{16}$$

式中:Δu_{φ}表示电压突变量;U_{set}为启动阈值,参考文献[21],本文取U_{set}大小为$0.1U_N$(U_N为系统的额定电压).

3.2 保护动作判据

定义电容模型和阻感模型的误差函数为

$$\begin{cases} E_C = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\left|C_{sm}\dfrac{\mathrm{d}(u_{cd})}{\mathrm{d}t} - i_{cd}\right|}{\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\left|C_{sm}\dfrac{\mathrm{d}(u_{cd})}{\mathrm{d}t}\right| + \left|i_{cd}\right|\right)} \\ E_{RL} = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\left|L_{sm}\dfrac{\mathrm{d}(i_{cd})}{\mathrm{d}t} + R_{sm}i_{cd} - u_{cd}\right|}{\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\left|L_{sm}\dfrac{\mathrm{d}(i_{cd})}{\mathrm{d}t} + R_{sm}i_{cd}\right| + \left|u_{cd}\right|\right)} \end{cases} \tag{17}$$

式中:n为数据窗内的采样点个数.考虑到数据采集过程中存在的数据坏点及微分误差,C_{sm}、R_{sm}、L_{sm}采用最小二乘法进行在线识别.以C_{sm}为例:

$$C_{sm} = \left[\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\right]^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B} \tag{18}$$

式中:$\boldsymbol{A} = \left[\dfrac{\mathrm{d}(u_{cd})}{\mathrm{d}t}(k), \cdots, \dfrac{\mathrm{d}(u_{cd})}{\mathrm{d}t}(n)\right]^{\mathrm{T}}$;T代表矩阵的转置;$\boldsymbol{B} = \left[i_{cd}(k), \cdots, i_{cd}(n)\right]^{\mathrm{T}}$.

3.3 三相线路性能分析

上述分析均基于单相线路,对于三相线路,当区内发生不对称接地故障时,故障相的耦合影响相对较小,所以较好地符合阻感模型,阻感模型误差小于电容模型误差,模型识别判据可以快速可靠动作.但对于健全相线路,故障发生初瞬,由于高频分量存在以及相间耦合的影响,电容模型误差较大,极限时会出现电容模型大于阻感模型的情况,导致无法区分故障相,严重影响保护的可靠性.因此,本文对于电容模型误差进行改进.

定义式(17)中的分子为$E_u = \left|C_{sm}\dfrac{\mathrm{d}(u_{cd})}{\mathrm{d}t} - i_{cd}\right|$,分母$E_s = \sum\limits_{i=1}^{n}\left(\left|C_{sm}\dfrac{\mathrm{d}(u_{cd})}{\mathrm{d}t}\right| + \left|i_{cd}\right|\right)$,以A相为例,改进电容模型误差为

$$\bar{E}_C(\mathrm{A}) = \frac{E_u(\mathrm{A})}{E_s(\mathrm{A}) + Y\left[E_s(\mathrm{B}) + E_s(\mathrm{C})\right]} \tag{19}$$

式中:$0 < Y < 1$;A、B、C表示不同相.

显然,由于引入了其余两相的模型标准量,$\bar{E}_C(\mathrm{A}) < E_C(\mathrm{A})$.此时若线路发生区内故障,$Y$越大,电容综合模型误差越小,健全相的模型识别判据可靠性越高,故障相的保护灵敏性有所降低.Y越小,电容综合模型误差越大,故障相的模型识别判据灵敏度越高,健全相保护可靠性则提高的较少.综上所述,Y值应该折中选取.

由式(19)可得,单相故障时,健全相的综合电容模型误差减小最少,保护可靠性提高的最少.三相故障时,故障相的综合电容模型误差减小最多,保护灵敏度下降最多.分析这两种情况,以进一步给出Y值的选择范围.

发生区内故障后,工频分量仍占据主要成分(本文对应为50/3 Hz).经数据窗积分计算得到的模型标准量E_s在数值上可以表示故障后各相差动电流幅值大小.发生A相接地故障时,B相和C相完好,E_s(B)、E_s(C)可以近似反映健全相电容电流的大小[28],此时$E_s(\mathrm{B}) \approx E_s(\mathrm{C})$.而$E_s$(A)近似反映了故障相电流的大

小,假设故障相与健全相的电容模型标准量之间的关系为$E_s(A)\approx ME_s(B)\approx ME_s(C)$.于是发生A相接地时B相的综合模型误差:

$$\bar{E}_C(B)=\frac{E_C(B)}{1+Y(1+M)} \tag{20}$$

对于三相故障,$E_s(A)\approx E_s(B)\approx E_s(C)$,此时B相的综合模型误差:

$$\bar{E}_C(B)=\frac{E_C(B)}{1+2Y} \tag{21}$$

综合模型误差是在稍微降低保护灵敏度的代价下大幅提高保护的可靠性.对于输电线路,发生概率最大的是单相接地故障,此时需保证健全相的可靠性,而三相故障虽然发生概率较小,但需保护迅速动作,需保证故障相的灵敏性.综合考量,取$\bar{E}_C\approx 0.6E_C$.此时有

$$\begin{cases}\dfrac{1}{1+2Y}>0.6\\ \dfrac{1}{1+Y(1+M)}<0.6\end{cases} \tag{22}$$

文献[29]提到,对于风电送出系统,直驱式风机所能提供的故障电流为1.5倍的额定电流,稳态时仅有1.4倍.低频输电系统的电容电流为额定电流的0.2倍[30].此时$E_s(A)$和$E_s(B)$的比值大概为7,因此本文取M=7.得到$\frac{1}{12}<Y<\frac{1}{3}$,由于上述分析均基于理论,在实际的装置整定时,需留有裕度,故本文取Y=0.2.

定义综合模型误差函数的保护判据:

$$\bar{E}_C>E_{RL} \tag{23}$$

保护流程如图7所示.

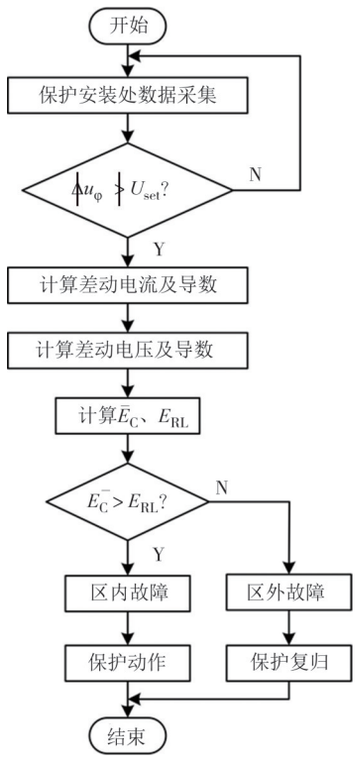


图7　保护流程

Fig.7　Protection process

表1　系统参数

Tab.1　System parameters

位置	参数名称	数值
风机	额定容量/MW	2
	风机数量	50
	额定电压/kV	0.69
	额定风速/(m·s^{-1})	12
	额定转速/(r·min^{-1})	22.5
电缆	线路电阻/(Ω·km^{-1})	0.121 3
	线路电感/(mH·km^{-1})	0.254
	线路电容/(μF·km^{-1})	0.171 6
	长度/km	100
M3C	低频侧频率/Hz	50/3
	低频侧电压/kV	220
	端口电容/uF	0.5

4　仿真验证

在PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示的海上风电低频输电系统模型,参数如表1所示.仿真所用采样频率为4 kHz,模型识别计算窗为10 ms.

4.1　电流差动保护的适应性验证

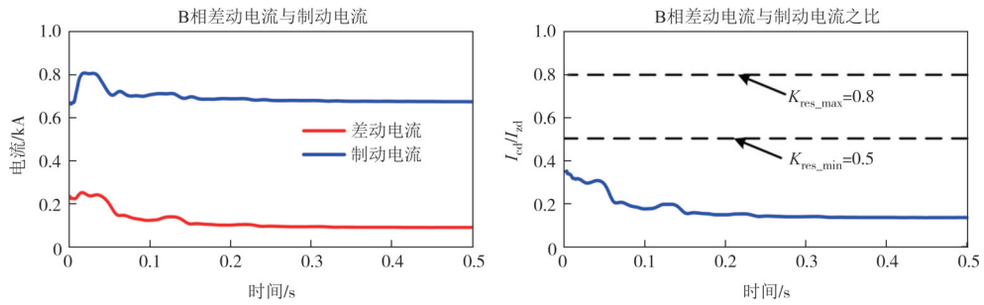
由本文1.3节分析可得,电流差动保护在发生单相接地和相间故障时将面临灵敏度下降甚至拒动风险.图8所示为f_3发生BC故障时差动电流与制动电流及比值,过渡电阻为1 Ω.

由图8可得,发生BC故障时制动电流远大于差动电流,差动电流与制动电流的比值小于整定值下限0.5,保护拒动,与理论分析一致.

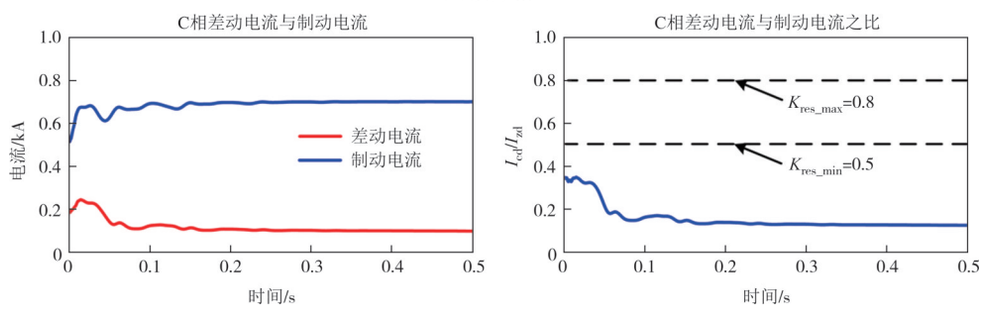
4.2　基于模型识别的保护原理验证

为验证保护方案的正确性,以图1所示f_1和f_3为例,设置BC两相金属性接地(BCG)故障,故障后三相的模型误差如图9所示.

由图9可得,当发生区内故障时,故障相的$\bar{E}_C>E_{RL}$,保护可靠动作,且阻感模型与电容模型有较大离散度.当发生区外故障时,所有相的$\bar{E}_C$均小于E_{RL},保护不会误动,本文所提原理正确.同时随着暂



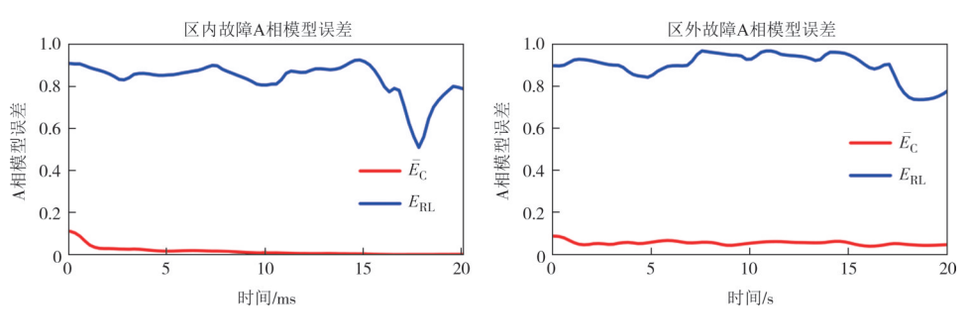
(a)故障相B



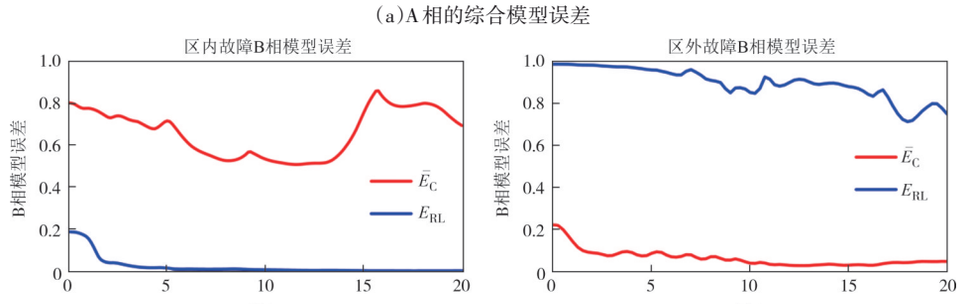
(b)故障相C

图8 区内BC故障下差动电流与制动电流比值

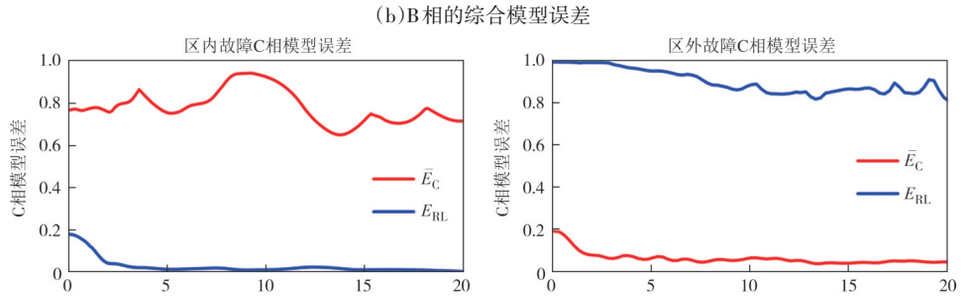
Fig.8 Ratio of differential current to restraining current of internal BC fault



(a)A相的综合模型误差



(b)B相的综合模型误差



(c)C相的综合模型误差

图9 区内、区外发生BCG时的仿真

Fig.9 Simulation results when BCG occurred externally and internally

态高频分量的衰减,故障相的阻感模型与健全相的电容模型逐渐趋于稳定.

4.3　不同故障条件下保护性能验证

为验证所提方法在不同故障条件下的保护性能,设置如图 1 所示的其余故障位置的仿真,故障类型为 A 相接地(AG)、BC、BCG、三相故障(ABC),计算结果如表 2 所示. 其中同一相的模型误差较大值加粗表示.

表 2　不同故障条件下仿真结果

Tab. 2　Simulation results under different fault conditions

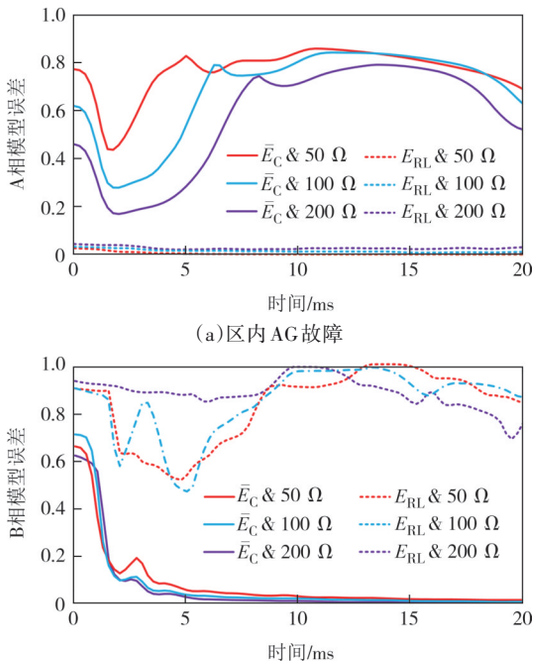
故障位置	故障类型	综合模型误差						判别结果
		A 相		B 相		C 相		
		$\bar{E}_C$	E_{RL}	$\bar{E}_C$	E_{RL}	$\bar{E}_C$	E_{RL}	
f_1	AG	0.01	**0.86**	0.01	**0.83**	0.01	**0.85**	区外
	BC	0.02	**0.87**	0.05	**0.68**	0.05	**0.70**	区外
	BCG	0.05	**0.92**	0.04	**0.87**	0.06	**0.88**	区外
	ABC	0.11	**0.98**	0.06	**0.88**	0.11	**0.93**	区外
f_2	AG	**0.67**	0.15	0.01	**0.85**	0.01	**0.87**	AG
	BC	0.01	**0.84**	**0.62**	0.14	**0.65**	0.11	BC
	BCG	0.01	**0.91**	**0.72**	0.25	**0.74**	0.09	BCG
	ABC	**0.75**	0.02	**0.55**	0.10	**0.40**	0.02	ABC
f_3	AG	**0.66**	0.15	0.01	**0.84**	0.01	**0.84**	AG
	BC	0.01	**0.84**	**0.59**	0.11	**0.59**	0.08	BC
	BCG	0.01	**0.80**	**0.69**	0.06	**0.75**	0.05	BCG
	ABC	**0.80**	0.08	**0.44**	0.15	**0.66**	0.11	ABC
f_4	AG	**0.64**	0.18	0.14	**0.83**	0.01	**0.85**	AG
	BC	0.01	**0.94**	**0.68**	0.13	**0.70**	0.11	BC
	BCG	0.01	**0.88**	**0.70**	0.25	**0.61**	0.03	BCG
	ABC	**0.75**	0.03	**0.43**	0.18	**0.58**	0.07	ABC
f_5	AG	0.02	**0.93**	0.02	**0.90**	0.02	**0.93**	区外
	BC	0.01	**0.95**	0.11	**0.76**	0.11	**0.72**	区外
	BCG	0.05	**0.85**	0.11	**0.87**	0.11	**0.89**	区外
	ABC	0.05	**0.95**	0.12	**0.85**	0.11	**0.89**	区外

由表 2 可得,当发生区外故障时,$\bar{E}_C < E_{RL}$,保护可靠不会误动. 当线路发生区内故障时,故障相的 $\bar{E}_C > E_{RL}$,保护可靠不会拒动,本文所提方法可以快速可靠地识别区内外故障.

4.4　保护的耐受过渡电阻能力

对于 220 kV 的输电线路,通常面临的高阻接地故障过渡电阻为 50~100 Ω[31],图 10 给出 f_3 发生 AG 和 f_5 发生 BCG 经不同过渡电阻故障时的综合模型误差.

由图 10(a)可知,当区内中点发生经不同过渡电阻接地时,随着过渡电阻的增大,i_t 逐渐减小,电容模型误差会略有下降,但在经历 200 Ω 过渡电阻故障时仍大于阻感模型误差. 保护能够可靠动作. 图 10(b)中,由于高频分量的存在,故障后初瞬 $\bar{E}_C$ 较大且 5 ms 后逐渐趋于稳定,但在不同过渡电阻接地下,满足 $\bar{E}_C < E_{RL}$. 本文所提方法具有较强的抗过渡电阻能力.



(a)区内 AG 故障

(b)区外 BCG 故障

图 10　不同过渡电阻下仿真结果

Fig.10　Simulation results under different transition resistors

4.5　保护的耐受噪声能力

实际的电力系统在运行过程中,经常会受到噪声干扰.220 kV 线路受到的噪声值一般不超过 25 dB[32]. 为验证噪声对本文所提保护方法的影响,在 f_2 点设置 ABC 故障,信噪比(SNR)为 35、30、25、20 dB. 此时 B 相和 C 相的综合模型误差如图 11 所示.

由图 11 可知,不同信噪比下所计算出的综合模型误差虽有较小波动,但保护均可以正常动作,即本文所提方法具有良好的抗噪能力.

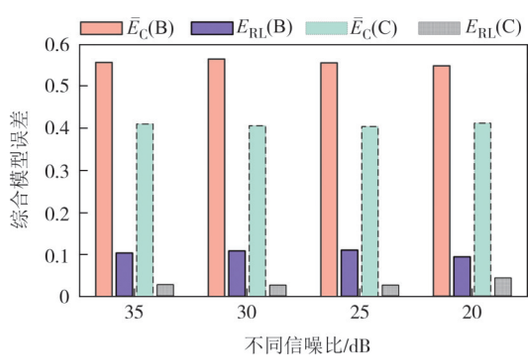
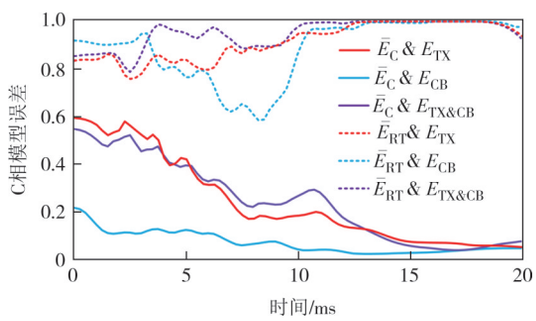


图 11　不同信噪比下仿真结果

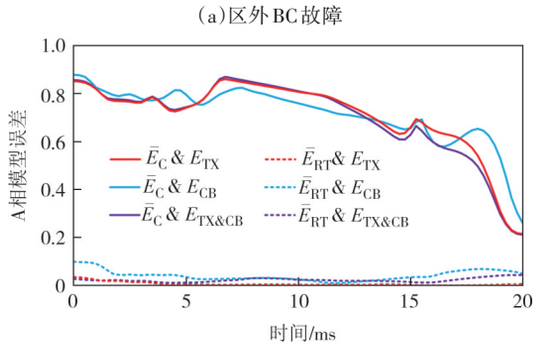
Fig.11　Simulation results under different SNR

4.6 保护的抗干扰声能力

现有的双端量保护在两端数据传输时通常采用乒乓对时法,一般存在通信误差.同时,互感器可能会出现10%的传变误差,极限情况下,双侧保护安装处共产生20%的传变误差.这些会对保护性能产生影响,如图12所示,当f_4点发生AG和f_1点发生BC时,出现的数据不同步及传变误差会对保护性能产生影响.图12中,E_{TX}表示两侧保护安装处的电流与电压存在1 ms通信误差.E_{CB}表示W侧的电流、电压均产生20%的传变误差.$E_{TX\&CB}$表示采样数据同时受通信和传变误差的影响.



(a)区外BC故障



(b)区内AG故障

图12 数据误差下仿真结果

Fig.12 Simulation results under data error

由图12可知,发生区内故障时,通信误差和传变误差对故障相的影响很小.当发生区外故障时,通信误差对电容模型影响较大,但即使面对极端情况,电容模型仍旧小于阻感模型,保护不会误动.本文所提方法有良好的抗干扰能力.

4.7 保护在不同控制策略下的性能

前文提到,现有的PMSG一般采用负序电流抑制策略,但《风电场接入电力系统技术规定 第1部分:陆上风电》(GB/T 19963.1—2021)规定,风电场应吸收部分负序电流以抑制负序电压升高.故表3给出当风电场采取负序电压抑制策略、M3C仍采用负序电流抑制策略时的综合模型误差.

由表3可得,虽然更换了控制策略导致换流器故障特征改变,但模型识别的本质是故障后系统拓扑结构变化使得线路参数发生变化,本文保护不受控制策略的影响.

表3 不同控制策略下仿真结果

Tab.3 Simulation results under different control strategies

故障位置	故障类型	综合模型误差						判别结果
		A相		B相		C相		
		$\bar{E}_C$	E_{RL}	$\bar{E}_C$	E_{RL}	$\bar{E}_C$	E_{RL}	
f_1	AG	0.01	**0.90**	0.01	**0.70**	0.01	**0.58**	区外
	BC	0.01	**0.96**	0.02	**0.95**	0.02	**0.79**	区外
	BCG	0.04	**0.85**	0.04	**0.90**	0.04	**0.75**	区外
	ABC	0.05	**0.88**	0.05	**0.87**	0.06	**0.58**	区外
f_4	AG	**0.76**	0.02	0.01	**0.66**	0.01	**0.60**	AG
	BC	0.01	**0.99**	**0.55**	0.12	**0.63**	0.18	BC
	BCG	0.01	**0.90**	**0.71**	0.05	**0.77**	0.03	BCG
	ABC	**0.76**	0.02	**0.47**	0.15	**0.61**	0.08	ABC

4.8 保护在不同采样频率下的性能

为验证所提保护方法在不同采样频率下的性能,本节分析了采样频率为2、4、8、10 kHz下f_3发生AG故障时的保护性能,仿真结果如图13所示.图中,SF表示采样频率(sampling frequencies).

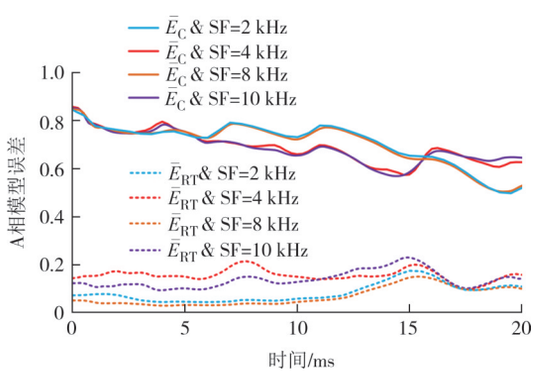


图13 不同采样频率下仿真结果

Fig.13 Simulation outcomes under different sampling frequencies

由图13可得,随着采用频率的增加,计算的结果几乎无变化.因此采样频率对本文所提保护方法影响较小,本方法可适用于不同采样频率的应用场景.

5 结 论

针对海上风电低频输电线路故障后,双侧换流器的控制策略使得传统保护面临灵敏度下降甚至拒动的问题,本文提出了一种适用于海上风电低频输电线路的纵联保护方法,该方法利用时域信息且不

受换流器控制策略影响.所得结论如下:

1)传统电流差动保护的动作性能受双侧换流器控制策略影响,在出现单相接地和相间故障时,将面临灵敏度下降甚至拒动的问题.

2)本文提出了基于模型识别的纵联保护方法,该方法在时域实现,避免了因相量提取的长数据窗,同时不受换流器控制策略影响,无需选相元件配合.

3)该方法具有较强的耐过渡电阻能力、抗噪声能力、抗干扰能力,且适用于不同采样频率下的应用场景,在面临不同故障条件下均能快速可靠地识别故障.

4)该方法具有良好的速动性,可作为海上风电低频输电线路的主保护,可为海上风电低频输电系统线路保护提供理论支撑.

参考文献

[1] 黄阳,陶永政,孔志达,等. 海上风电柔性低频输电系统的技术经济分析[J]. 电网技术,2024,48(12):4865-4875.
HUANG Y, TAO Y Z, KONG Z D, et al. Techno-economic analysis of flexible low-frequency transmission system for offshore wind farm integration[J]. Power System Technology, 2024, 48(12):4865-4875.(in Chinese)

[2] 黄明煌,王秀丽,刘沈全,等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):167-174.
HUANG M H, WANG X L, LIU S Q, et al. Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(5):167-174.(in Chinese)

[3] 顾乔根,张晓宇,吕航,等. 基于故障负序分量的低频变压器快速差动保护[J]. 电力系统自动化,2023,47(7):184-192.
GU Q G,ZHANG X Y,LYU H,et al. Fast differential protection of low-frequency transformer based on fault negative sequence component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7):184-192.(in Chinese)

[4] 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 J H,ZHANG C H,SONG G B,et al. Adaptability analysis of current differential protection in low-frequency transmission lines of offshore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(1):131-139.(in Chinese)

[5] 郑涛,康恒. 基于控保协同的柔性低频输电系统电流差动保护性能提升方案[J]. 电工技术学报,2025,40(7):2162-2177.
ZHENG T, KANG H. Improvement of current differential protection performance of flexible low-frequency transmission system based on control and protection cooperation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2162-2177.(in Chinese)

[6] 黄涛,文继锋,赵青春,等. 基于等效序阻抗差异特征的低频输电线路差动保护优化方案[J]. 电力自动化设备,2024,44(5):143-150.
HUANG T,WEN J F,ZHAO Q C,et al. Optimization scheme for differential protection of low frequency transmission line based on equivalent sequence impedance difference characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 143-150.(in Chinese)

[7] 李海锋,许永治,刘沈全,等. 柔性低频输电系统的故障分量特征及保护适用性分析[J]. 高电压技术,2024,50(5):1987-1996.
LI H F, XU Y Z, LIU S Q, et al. Analysis of fault component characteristics and protection applicability on flexible low frequency transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2024,50(5):1987-1996.(in Chinese)

[8] 贾锋,王麒铭,张雅君,等. 基于柔性低频输电风电系统的变电压运行控制方法[J]. 电力系统自动化,2024,48(21):38-48.
JIA F, WANG Q M, ZHANG Y J, et al. Variable-voltage operation control method for wind power system with flexible low-frequency transmission [J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(21):38-48.(in Chinese)

[9] 徐路遥,宋平. 低频输电系统中运行频率对变流器稳定性影响分析[J]. 电力自动化设备,2024,44(10):92-98.
XU L Y,SONG P. Analysis on impact of operating frequency on stability of converter connected to low frequency transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(10):92-98.(in Chinese)

[10] 郑文迪,许启东,邵振国,等. 基于k/n(G)模型的MMC系统可靠性建模与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(12): 108-116.
ZHENG W D,XU Q D,SHAO Z G,et al. Reliability modeling and analysis of MMC system based on k/n(G)model[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2020,47(12):108-116.(in Chinese)

[11] 韩华春, 宁联辉,李辰辰,等. 海上风电M3C换流器虚拟同步发电机控制[J]. 电力工程技术,2024,43(6):78-87.
HAN H C, NING L H, LI C C, et al. Virtual synchronous generator control strategy of M3C converter in fractional frequency offshore wind power system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6):78-87.(in Chinese)

[12] 高淑萍, 沈渠旺, 宋国兵. 一种适用于混合三端直流系统的纵联保护方案[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(4):125-135.
GAO S P, SHEN Q W, SONG G B. A pilot protection scheme for hybrid three-terminal DC systems [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(4): 125-135.(in Chinese)

[13] ZHENG L M, JIA K, YANG B, et al. Singular value decomposition based pilot protection for transmission lines with converters on both ends [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2022,37(4): 2728-2737.

[14] 余越,王聪博,沙兆义, 等. 基于矩阵突变特征的风电经柔直送出交流线路保护[J]. 中国电机工程学报,2023,43(14):5441-5450.
YU Y, WANG C B, SHA Z Y, et al. AC transmission line protection for wind farms integrated with VSC-HVDC system based on matrix mutation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(14): 5441-5450.(in Chinese)

[15] 郑涛,宋祥艳. 基于故障暂态行波高低频能量比值的交流输电

线路快速保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12):4616-4629.
ZHENG T, SONG X Y. Fast protection scheme for AC transmission lines based on ratio of high and low frequency energy of transient traveling waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4616-4629.(in Chinese)

[16] 高淑萍,段云青,宋国兵,等. 基于首行波曲率半径的交直流互联电网交流输电线路单端量保护[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(6):148-158.
GAO S P, DUAN Y Q, SONG G B, et al. Single-terminal protection of AC transmission lines in AC-DC network based on curvature radius of first traveling wave [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(6): 148-158.(in Chinese)

[17] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016 ,40(11): 3580-3585.
SONG G B, WANG C Q, TANG J S, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.(in Chinese)

[18] 鲁月华, 樊艳芳, 罗瑞. 适用于交直流混联系统的时域全量故障模型判别纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 81-88.
LU Y H, FAN Y F, LUO R. Principle of active distribution network pilot protection based on time domain model identification [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 81-88.(in Chinese)

[19] 索南加乐, 杨铖, 邵文权. 基于模量的线路模型识别纵联保护新原理[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 21-24.
SUONAN J L, YANG C, SHAO W Q. Model recognition longitudinal protection based on modules for transmission lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 21-24.(in Chinese)

[20] 高淑萍, 牛丹, 宋国兵,等. 基于模型识别和电流极性的混合式双极型直流输电线路纵向保护[J]. 科学技术与工程,2020, 20(23): 9408-9413.
GAO S P, NIU D, SONG G B, et al. Longitudinal protection of hybrid bipolar DC transmission lines based on model identification and current polarity [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(23): 9408-9413.(in Chinese)

[21] 宋国兵,高校平,张晨浩,等. 海上风电低频输电系统快速母线保护[J]. 电力系统自动化,2024,48(2): 29-36.
SONG G B, GAO X P, ZHANG C H, et al. Fast busbar protection for low-frequency transmission system of offshore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 29-36.(in Chinese)

[22] YAO W X, LIU J, LU Z Y. Distributed control for the modular multilevel matrix converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3775-3788.

[23] 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 X P, ZHANG C H, SONG G B, 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.(in Chinese)

[24] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 5版. 北京: 中国电力出版社, 2018.
HE J L, LI Y L, DONG X Z, et al. Principles of relay protection of electric power system[M]. 5th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2018.(in Chinese)

[25] 杨子荷. 计及直流系统影响的逆变侧交流线路电流差动保护性能分析与研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
YANG Z H. Research on adaptation of AC current differential protection at the inverter side in HVDC/AC interconnected system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.(in Chinese)

[26] 侯俊杰, 樊艳芳, 晁勤, 等. 基于时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 89-96.
HOU J J, FAN Y F, CHAO Q, et al. Cluster wind power outgoing line pilot protection scheme based on time-domain full-frequency fault model correlation identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 89-96.(in Chinese)

[27] 余越, 王聪博, 樊沛林, 等. 基于差动电流能量比的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 851-859.
YU Y, WANG C B, FAN P L, et al. Pilot protection based on energy ratio of differential current for outgoing line from renewable power plants[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 851-859.(in Chinese)

[28] 王晨清,宋国兵,迟永宁,等. 风电系统故障特征分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):52-58.
WANG C Q, SONG G B, CHI Y N, et al. Fault characteristics analysis of wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 52-58.(in Chinese)

[29] 陆振纲, 谢立军, 赵国亮, 等. 海上风电柔性低频送出系统无功电压协调控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3708-3720.
LU Z G, XIE L J, ZHAO G L, et al. Coordinated reactive power-voltage control strategy of flexible low-frequency transmission system for offshore wind power integration [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3708-3720.(in Chinese)

[30] 王少雄, 吕思辰, 吕飞鹏, 等. 基于Fréchet距离的集中式光伏场站送出线路纵联保护方法[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1648-1657.
WANG S X, LÜ S C, LYU F P, et al. Fréchet distance based pilot protection method for centralized photovoltaic station transmission lines[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1648-1657.(in Chinese)

[31] 刘乃皓, 高厚磊, 徐彬, 等. 基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 65-75.
LIU N H, GAO H L, XU B, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on similarity of current variation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 65-75.(in Chinese)

[31] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分:陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for connecting wind farm to power system: Part 1: On shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)