

引用格式:张林,王洪彬,陈迅,等.基于控保协同的适配全比例新能源电网突变量选相元件能力恢复策略[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):53-62.

Citation: ZHANG Lin, WANG Hongbin, CHEN Xun, et al. Phase selection capacity recovery strategy for full-scale new energy grid based on coordinated control and protection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 53-62.

基于控保协同的适配全比例新能源电网突变量 选相元件能力恢复策略

张林¹, 王洪彬¹, 陈迅¹, 林湘宁², 李正天², 魏繁荣²

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 逆变器在故障时采取负序抑制控制策略及低电压穿越控制策略, 导致全比例新能源系统中储能场站侧正、负序电流分布系数严重不相等, 引发相电流差突变量选相元件不正确选相。基于故障分量网络, 推导了相电流差突变量选相元件正确选相的限制条件, 提出一种基于故障分量调控的相电流差突变量选相元件性能恢复方案。该方案能消除由于正、负序电流分布系数不相等而引发的储能侧选相性能下降的问题。仿真结果表明, 所提方案恢复了传统电流突变量选相元件在全比例新能源系统中储能侧的性能, 使现有电流突变量选相方案仍能适应高渗透率甚至全比例新能源电网。

关键词: 孤岛系统; 相电流差突变量选相; 故障分量调控; 控保协同; 适应性分析

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.006 中图分类号: TM64 文章编号: 1673-9140(2026)01-0053-10

Phase selection capacity recovery strategy for full-scale new energy grid based on coordinated control and protection

ZHANG Lin¹, WANG Hongbin¹, CHEN Xun¹, LIN Xiangning², LI Zhengtian², WEI Fanrong²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The negative-sequence suppression control strategy and low-voltage ride-through control strategy are adopted when the inverter-based power supply fails, which leads to a serious inequality between the distribution coefficients of positive- and negative-sequence currents at the energy storage station side in a full-scale new energy system, resulting in incorrect phase selection of the phase current difference mutation element. Based on the fault sequence component network, the constraint condition for the correct phase selection of the phase current difference mutation element is derived. A phase selection performance recovery scheme based on fault component regulation is proposed, which can eliminate the degradation of phase selection performance at the energy storage side caused by unequal distribution coefficients of positive- and negative-sequence currents. Simulation results show that the proposed scheme restores the performance of the traditional current mutation phase selection element at the energy storage side in a full-scale new energy system, enabling existing current mutation phase selection schemes to remain applicable to high-penetration and even full-scale new energy grids.

Key words: islanded system; phase selection of phase current difference mutation; fault component regulation; coordinated control and protection; adaptability analysis

收稿日期: 2024-11-28; 修回日期: 2025-04-07

基金项目: 国网重庆市电力公司科技项目(52202324001Z)

通信作者: 李正天(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事继电保护、微电网与配电自动化等研究; E-mail: 453874933@qq.com

随着可再生能源的接入比例逐渐升高,完全由逆变电源构成的全可再生能源电网将是未来电网的形态之一,其电源完全由光伏、风电、储能构成,此种能源结构有望应用于风、光资源丰富但水、火资源缺乏的地区。目前,含新能源的电网中,纵联电流差动保护及距离保护均出现性能劣化,新能源的故障特性对继电保护构成威胁,若系统全由逆变电源组成,则其对继电保护的威胁将进一步加剧。

在高压电网中,重合闸的广泛应用依赖于选相元件的正确配合。因此,选相元件是其可靠动作的关键辅助装置,而相电流差突变量选相元件是其中应用最广的一种。

相电流差突变量选相元件在新能源接入大电网的适应性已经有学者进行了研究。文献[1]针对光伏场站送出线路的相电流差突变量选相元件的适应性进行了仿真分析。文献[2]从故障序阻抗入手,分析了相电流差突变量选相元件的动作特性,得出了逆变电源侧不能正确选相而大电源侧动作性能不受影响的结论。文献[3]推导了光伏场站送出线路故障电流的表达式,基于故障电流解析式分析了突变量选相元件的不适应机理,指出光伏电站侧相电流差选相元件会不正确动作的问题。文献[4]推导了双馈风电场撬棒投入后的序阻抗表达式,指出撬棒投入后由于电源正、负序阻抗不再近似相等而导致电流突变量选相元件失效。文献[5-6]基于故障序分量网络对相电流差突变量选相元件在风电接入系统中的适应性进行研究,指出由于正、负序阻抗波动导致正、负序电流分支系数不再近似相等而造成选相失败。

为解决上述问题,现有新能源场站侧相电流差突变量选相元件的解决方案已有较多研究成果。如文献[7]提出一种新型相电流差突变量选相元件,但此方案的前提是电流分支系数为实数,并不符合电力电子设备高渗透率电网下电流分支系数的特征。文献[8]采用控保结合的思路,在故障时闭锁故障控制策略,以恢复新能源侧负序电流水平,并控制正序电流等于负序电流,创造新能源场站侧正序电流分支系数相等条件。此方案需要闭锁负序抑制控制策略,导致电流环可能无法跟踪上所需参考值,方案的可靠性无法保障且该方案需要对侧电气量信息,对通信条件较为苛刻。文献[9]提出了一种基于正序故障电流补偿的改进电流突变量选

相方案,该方案需要计算补偿系数,但故障后由于低电压穿越控制策略的投入,逆变电源的内阻抗在实时变化,依据最大、最小运行方式计算的平均阻抗得到的补偿系数并不可靠。

上述研究提供了本文的研究基础,指出了选相元件在新能源场站侧会出现错误选相的问题,对于系统侧都默认为大电源,不受新能源接入的影响。但是,对于全比例新能源电网,系统侧不再是大电源而是储能电站,其故障电流亦受容量、电力电子器件的限流策略等因素影响,其适应性与传统同步机大不相同。因此,亟待在厘清适应性的基础上,研究相对应的选相元件性能恢复对策。

为此,本文针对全比例新能源电网中储能侧选相元件性能下降的问题,首先在计及故障期间逆变电源投入故障控制策略的基础上,在故障分量网络中分析了正、负序分支系数的特征;其次,在相电流差突变量选相原理的基础上,分析了储能侧选相元件不适应机理;再次,利用电力电子设备灵活可控的特性,提出了基于故障分量调控的选相性能恢复策略,有效解决了选相性能下降的问题,并且不影响其他保护方案的性能;最后,通过仿真验证了上述选相元件动作适应性分析的正确性及所提性能恢复策略的可行性。

1 逆变型电源控制策略

1.1 模型假设

全比例新能源电路拓扑结构如图1所示。 M 侧的风光新能源场站由光伏电源和直驱风机组成^[10],采用恒功率控制即 PQ 控制,向系统输送稳定的功率; N 侧储能场站作为主控电源采用定电压、频率控制即 V/f 控制,为全比例新能源系统提供稳定的电压、频率参考^[11-12]。

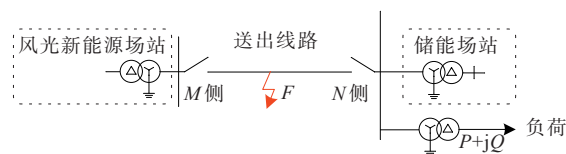


图1 全比例新能源电路拓扑结构

Figure 1 Full-scale new energy circuit topology

1.2 低电压穿越控制策略

为保障负荷安全运行,防止逆变电源退出运行,根据国家电网制定的逆变型电源并网规定, PQ 控制的逆变电源应采取低压穿越控制(low voltage ride-through, LVRT)^[13],限制逆变器短路电流的幅

值,防止其越限且优先向系统注入无功,以尽可能支撑并网点电压^[14-15],维持系统稳定直至故障切除,其表达式如下:

$$\begin{cases} I_q = \min \{ 1.5(0.9 - U_{cc}) I_N, I_{\max} \} \\ I_d = \min \{ P_{\text{ref}}/U_{cc}, \sqrt{I_{\max}^2 - I_q^2} \} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_q 为无功电流; I_d 为有功电流; U_{cc} 为并网点电压; I_N 为额定电流; P_{ref} 为有功功率参考值; I_{\max} 为最大输出电流,通常为额定电流的 1.2~2.0 倍。

1.3 负序抑制控制策略

本文采用的负序电流抑制策略通过在电流内环中的 d 、 q 轴 PI 控制器上分别叠加谐振控制器,以筛选出 d 、 q 轴电流中的二倍频负序分量,并将其参考值设置为 0,从而实现了静止三相坐标系下的负序电流抑制^[16]。以有功-无功控制策略的电流内环为例,电流内环中的负序电流抑制策略如图 2 所示,其中 $I_{q\text{ref}}$ 为无功电流参考; $I_{d\text{ref}}$ 为有功电流参考; Q_{ref} 为无功功率参考; P_{ref} 为有功功率参考。

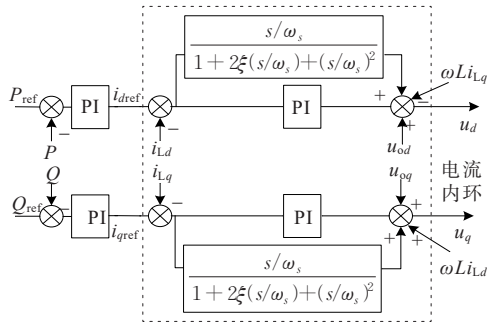


图 2 电流内环中的负序电流抑制策略

Figure 2 Negative-sequence current suppression strategy in inner current loop

V/f 控制的储能侧需要给系统提供稳定的电压频率参考^[17],所以应保证故障期间储能侧采取负序电压抑制策略来维持对称的三相电压以防止由三相不平衡造成的相电流峰值变大^[14]。其负序电压抑制方案与新能源场站负序电压抑制方案一致。

2 突变选相元件动作性能分析

当线路发生故障时,逆变电源投入故障控制策略,文献[1-6]分析了突变选相元件在逆变型电源并网场景下的适用性。对于系统侧选相元件,由于逆变电源相对于强系统来说为弱馈电源,系统侧选相元件不受逆变型电源的影响。但在全比例新能源电网中,系统侧被替代为采用 V/f 控制的储能场

站,在故障期间投入低压穿越控制及负序电压抑制策略,其故障序网络受故障控制策略的影响,故障电流也会因此受限。根据图 1 所示的系统,本文以线路 MN 上 F 点发生 A 相接地故障为例,具体分析储能场站侧突变选相元件的性能,其故障分量网络如图 3 所示。

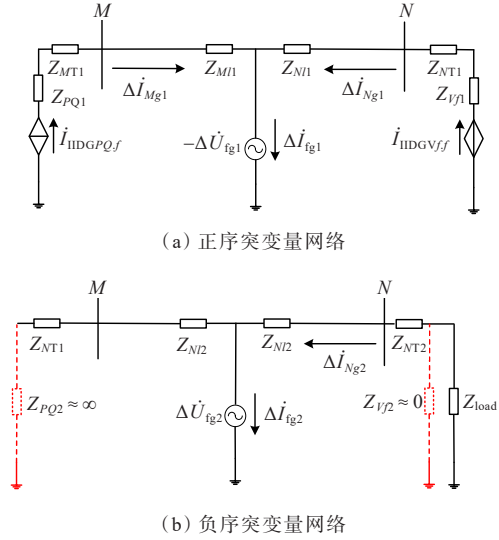


图 3 故障分量网络

Figure 3 Fault component network

本文定义 ΔI_{AB} 、 ΔI_{BC} 、 ΔI_{CA} 为线路保护安装处相电流差突变量,当线路发生故障时,各相间突变量的表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{AB} = (1 - \alpha^2) C_1 \Delta \dot{I}_{fg1} + (1 - \alpha) C_2 \Delta \dot{I}_{fg2} \\ \Delta \dot{I}_{BC} = (\alpha^2 - \alpha) C_1 \Delta \dot{I}_{fg1} + (\alpha - \alpha^2) C_2 \Delta \dot{I}_{fg2} \\ \Delta \dot{I}_{CA} = (\alpha - 1) C_1 \Delta \dot{I}_{fg1} + (\alpha^2 - 1) C_2 \Delta \dot{I}_{fg2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\alpha = -0.5 + j\sqrt{3}/2$; C_1 为储能侧正序故障分量电流分布系数; C_2 为储能侧负序故障分量电流分布系数; \dot{I}_{fg1} 为故障点正序故障分量电流; \dot{I}_{fg2} 为故障点负序故障分量电流。

如图 3(a) 所示,由于投入低压穿越控制策略,风/光新能源场站侧及储能场站侧故障电流幅值、相位受控,可在故障分量网络中等效为受控电流源及受控电压源,其输出的故障电流受故障类型、故障位置、故障程度及正常运行时功率参考值等因素影响,进而影响两侧故障电流的相位,定义储能侧正序电流分布系数 $C_1 = x + jy$ 。

如图 3(b) 所示,由于逆变型电源在不对称故障时采用负序电流及电压抑制控制策略,导致 PQ 控制的逆变型电源负序阻抗极大,风/光新能源场站侧负序网络相当于断路。 V/f 控制的逆变型电源负

序阻抗极小。根据负序故障网络特征可知,新能源侧负序电流分布系数为0,储能侧负序电流分布系数 C_2 为1。

将储能场站侧正、负序电流分布系数代入式(2)并求模值,整理得:

$$\begin{cases} |\Delta I_{AB}| = \sqrt{3x^2 + 3y^2 + 3x - 3\sqrt{3}y + 3} |\Delta I_{fg1}| \\ |\Delta I_{BC}| = \sqrt{3x^2 + 3y^2 - 6x + 3} |\Delta I_{fg1}| \\ |\Delta I_{CA}| = \sqrt{3x^2 + 3y^2 + 3x + 3\sqrt{3}y + 3} |\Delta I_{fg1}| \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,三者大小关系不明确,无法判断是否满足A相接地故障的选相特征,具体分析三者大小关系。

令 $\arctan(y/x) = \varphi$, 定义 φ 为储能侧正序电流分布系数的相位。若满足A相接地故障的选相条件,则须满足的不等式关系应为

$$\begin{cases} |\Delta I_{BC}| < |\Delta I_{CA}| \\ |\Delta I_{BC}| < |\Delta I_{AB}| \end{cases} \quad (4)$$

1) 当 $x > 0, y > 0$ 时,若满足式(4),则需要满足的不等式关系为

$$-\sqrt{3} < \frac{y}{x} < \sqrt{3} \quad (5)$$

由式(5)可知,当储能侧正序电流分布系数的相位 φ 在 $(-60^\circ, 60^\circ)$ 时可选项正确。

2) 当 $x > 0, y < 0$ 时,若满足式(4),则需要满足的不等式关系为

$$-\sqrt{3} < \frac{y}{x} < 0 \quad (6)$$

由式(6)可知,当储能侧正序电流分布系数的相位 φ 在 $(-60^\circ, 0^\circ)$ 时可选项正确。

3) 当 $x < 0, y > 0$ 时,若满足式(4),则需要满足的不等式关系为

$$\begin{cases} \frac{y}{x} < -\sqrt{3}, & |\Delta I_{BC}| < |\Delta I_{CA}| \\ \frac{y}{x} > \sqrt{3}, & |\Delta I_{BC}| < |\Delta I_{AB}| \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,当 $x < 0, y > 0$ 时, $|\Delta I_{BC}| < |\Delta I_{AB}|$ 不成立,选相结果错误。

由上述分析可知,相电流差突变量选相元件在全比例新能源电网下的储能场站侧出现正确选相条件受限甚至错误选相的问题,无法可靠地为距离保护或重合闸提供正确选相信息。

3 突变量选相元件性能恢复策略

3.1 突变量选相元件性能恢复原理

为解决相电流差突变量选相元件在全比例新能源系统中储能场站侧不适应的问题,利用电力电子设备灵活、可控的特点,控制故障分量大小,有望在故障期间恢复选相元件的性能,在短时间内实现保护的出口跳闸。

由文2的分析可知,当线路发生不对称故障时,由于风机/光伏侧采取负序电流抑制的控制策略,导致储能侧电流分布系数近似为1,如下:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\Delta I_{Ng1}}{\Delta I_{fg1}} = \frac{\Delta I_{Ng1}}{\Delta I_{Ng1} + \Delta I_{Mg1}} \\ C_2 = \frac{\Delta I_{Ng2}}{\Delta I_{fg2}} = \frac{\Delta I_{Ng2}}{\Delta I_{Ng2} + 0} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, ΔI_{Ng1} 与 ΔI_{Ng2} 分别为风机以及光伏侧输出的负序电流变化量; ΔI_{fg1} 与 ΔI_{fg2} 分别为风机以及光伏输出时故障点处总的负序电流变化量; ΔI_{Mg1} 为储能侧输出的负序电流变化量。

若要使相电流差突变量选相元件性能不受影响,应保证储能侧正、负序电流分布系数相等,需要将风机/光伏侧的正序电流故障分量抑制为0,使储能侧正序电流分布系数为1,如此储能侧正、负序电流分布系数都为1,则选相元件处于最佳工作状态,如下:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\Delta I_{Ng1}}{\Delta I_{fg1}} = \frac{\Delta I_{Ng1}}{\Delta I_{Ng1} + 0} = 1 \\ C_2 = \frac{\Delta I_{Ng2}}{\Delta I_{fg2}} = \frac{\Delta I_{Ng2}}{\Delta I_{Ng2} + 0} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

将正、负序电流分布系数等于1代入式(2)中可得:

$$\begin{cases} \Delta I_{AB} = (1 - \alpha^2) \Delta I_{fg1} + (1 - \alpha) \Delta I_{fg2} \\ \Delta I_{BC} = (\alpha^2 - \alpha) \Delta I_{fg1} + (\alpha - \alpha^2) \Delta I_{fg2} \\ \Delta I_{CA} = (\alpha - 1) \Delta I_{fg1} + (\alpha^2 - 1) \Delta I_{fg2} \end{cases} \quad (10)$$

本文以A相接地故障为例,将故障边界条件代入式(10),求解相电流差突变量的幅值大小:

$$\begin{cases} |\Delta I_{AB}| = |(2 - \alpha^2 - \alpha) \Delta I_{fg1}| = 3 |\Delta I_{fg1}| \\ |\Delta I_{BC}| = 0 \\ |\Delta I_{CA}| = |(\alpha + \alpha^2 - 2) \Delta I_{fg1}| = 3 |\Delta I_{fg1}| \end{cases} \quad (11)$$

如式(11)所示,抑制正序电流突变量后,储能侧各相电流差突变量的模值满足A相接地的特征,

其大小关系为

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{BC}| \ll |\Delta \dot{I}_{AB}| \\ |\Delta \dot{I}_{BC}| \ll |\Delta \dot{I}_{CA}| \end{cases} \quad (12)$$

3.2 故障分量调控控制策略

本文提出的基于故障分量调控的正序电流突变量抑制控制策略的构建思路为:通过调控风机/光伏侧逆变器馈出的正序电流,使其与故障前的电流幅值及相位保持一致,保证了故障前、后正序电流突变量为0;根据文 3.1 阐述的原理,解决在孤岛系统下由于储能侧正、负序电流分布系数严重不相等而造成的选相失败问题。

由文献[14]可知,当发生不对称故障时,风机/光伏侧逆变型电源可等效为受并网点正序电压控制的受控电流源模型,其故障电流矢量图如图 4 所示。其中, $I_{q,F}$ 和 $I_{d,F}$ 分别为风机/光伏侧故障电流的有功及无功分量; $\dot{U}_{P,F}^+$ 为并网点正序电压; \dot{I}_F 为故障电流。

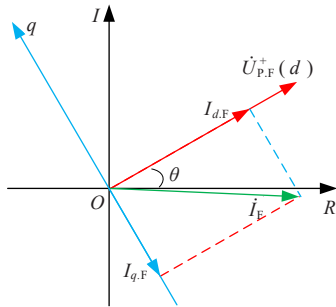


图 4 电流、电压矢量图

Figure 4 Current and voltage vectors

由图 4 可知, $I_{q,F}$ 与 $I_{d,F}$ 比值的反正切值为并网点正序电压与故障电流的相位差; \dot{I}_F 的模值为根号下 $I_{q,F}$ 与 $I_{d,F}$ 的平方和,各自表达式为

$$\begin{cases} \varphi_{U^+} - \varphi_{I_F} = \arctan\left(\frac{I_{q,F}}{I_{d,F}}\right) \\ |\dot{I}_F| = \sqrt{(I_{q,F})^2 + (I_{d,F})^2} \end{cases} \quad (13)$$

式中, φ_{U^+} 为并网点正序电压的相位; φ_{I_F} 为故障电流的相位。

由式(13)可知,通过控制 $I_{q,F}$ 与 $I_{d,F}$ 的比值可间接控制并网点正序电压与故障电流的相位差,以此调整故障后的电流相位与故障前的电流相位,使其保持一致;通过限制 $I_{q,F}$ 与 $I_{d,F}$ 的平方和大小可控制故障电流的幅值,以此保证故障前、后馈出电流幅值的大小相等。

新控制策略下的电流、电压矢量图如图 5 所示。

其中, \dot{I}_W 为系统故障前电流, η 为 0 系统未发生故障时并网点电压与电流的相位差, λ 为故障后电压与故障前电压的相位差。 $I'_{d,F}$ 和 $I'_{q,F}$ 分别为投入新控制策略后风机/光伏侧故障电流的有功及无功分量; $\dot{U}_{P,F}^+$ 为投入新控制策略后并网点正序电压。

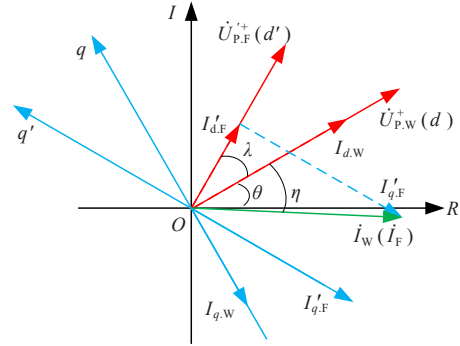


图 5 新控制策略下的电流、电压矢量图

Figure 5 Current and voltage vectors under new control strategy

故障发生后,并网点电压的相位出现变化,此时若想使故障后输出的电流相位与故障前输出的电流相位保持一致,就需要计算出故障后并网点正序电压与故障前电流相位之间的相位差。由图 5 可知, $\dot{U}_{P,F}^+$ 与 \dot{I}_W 之间的相位差为 $\lambda + \eta$,所以故障后所需要控制的 $I'_{q,F}$ 与 $I'_{d,F}$ 的比值应为

$$\frac{I'_{q,F}}{I'_{d,F}} = \tan(\lambda + \eta) \quad (14)$$

故障前电流幅值如式(13)所示,若要保证故障前、后电流幅值大小相等,则需要满足的关系式应为

$$\sqrt{(I'_{q,F})^2 + (I'_{d,F})^2} = \sqrt{(I_{q,W})^2 + (I_{d,W})^2} \quad (15)$$

式中, $I_{d,W}$ 与 $I_{q,W}$ 分别为从新能源设备侧得到的故障电流 d 轴和 q 轴分量; $I'_{d,W}$ 与 $I'_{q,W}$ 分别为从系统侧得到的故障电流 d 轴和 q 轴分量。

联立式(14)、(15),可得:

$$\frac{I'_{q,F}}{\sqrt{(I_{q,W})^2 + (I_{d,W})^2} - (I'_{q,F})^2} = \tan(\lambda + \eta) \quad (16)$$

由式(15)可知, $I_{d,W}$ 、 $I_{q,W}$ 、 λ 、 η 都为已知量,则可求出 $I'_{q,F}$,即采取正序电流突变量抑制控制策略所需要输入的电流内环 q 轴分量。将 $I'_{q,F}$ 代入式(16)中可求出 $I'_{d,F}$,即采取正序电流突变量抑制控制策略所需要输入的电流内环 d 轴分量。新控制策略下的逆变器控制结构如图 6 所示。

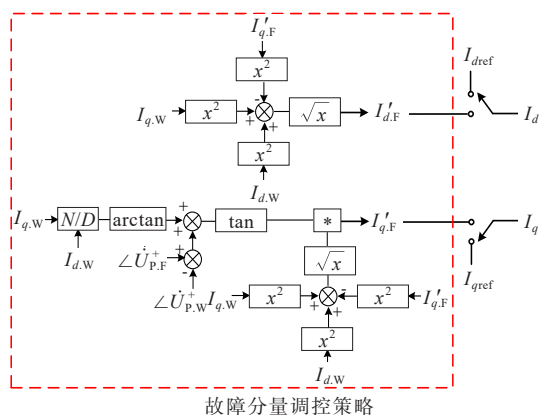


图6 新控制策略下的逆变器控制结构

Figure 6 Inverter control structure under new control strategy

3.3 方案流程

1) 启动判据。

本文的启动判据采用文献[18]中的电压突变量启动判据,即当检测到并网点电压跌落 ΔU_{pcc} 超过整定值时,投入新控制策略,如下:

$$\Delta U_{\text{pcc}} > \varepsilon \quad (17)$$

式中, ε 为门槛值,本文门槛值整定为 $\varepsilon = 0.15 \text{ kV}$ 。实际工程中可根据可靠性要求进行调整。

2) 策略闭锁判据。

当策略投入后,控制系统出现故障或出现延迟则可能造成故障分量调控失败,为避免后续出现错误选相的情况,本方案加入闭锁判据:

$$|\Delta I_{\text{PV}}^+| \leq I_{\text{res}} \quad (18)$$

式中, ΔI_{PV}^+ 为新能源场站侧正序电流突变量; I_{res} 为闭锁判据的门槛值,其整定主要考虑在各种不同的故障工况下,投入控制策略并稳定发挥作用后所产生的最大角度偏差及幅值偏差。本文通过仿真遍历得到故障前与控制作用稳定后电流的相位差最大是 10° ,电流幅值波动不超过 0.02 kA ,因此整定参数 $I_{\text{res}} = 0.02 \text{ kA}$ 。

3) 新方案流程。

新控制策略下的选相流程如图7所示。本文所用相电流差突变量选相判据与现有选相元件的判据相同。发生故障后,新能源场站首先检测并网点电压跌落。当跌落值超过门槛值时,投入本文控制策略,新能源场站侧记录正序电流并计算正序电流突变量;当所计算的正序电流突变量小于所设定的门槛值时,认为控制策略投入成功,此时选相元件理应达到最佳工作性能,可计算各相电流差突变量大小,并按照文献[3]所给出的选相判据进行选相。

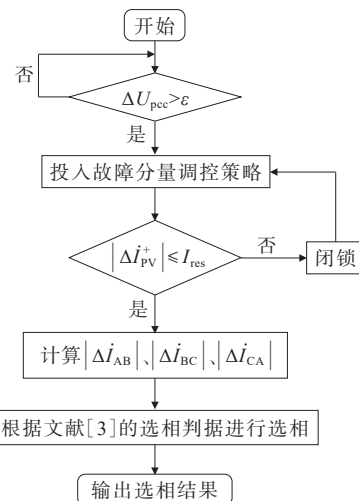


图7 新控制策略下的选相流程

Figure 7 Phase selection procedure under new control strategy

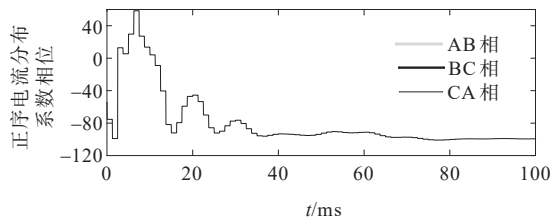
4 算例分析

本文基于PSCAD/EMTDC平台搭建如图1所示的仿真模型,其中全比例新能源系统电压等级为 220 kV 、频率为 50 Hz 。风机/光伏侧系统容量为 $150 \text{ MV}\cdot\text{A}$,有功输出指令值为 40 MW ,无功输出指令值为 0 MVar 。储能侧系统容量为 $50 \text{ MV}\cdot\text{A}$,电压参考值为 35 kV 。主变压器的额定容量为 $150 \text{ MV}\cdot\text{A}$,接线为 YNd11 ,漏抗为 0.14 p.u. ,线路长度为 100 km ,正序电阻为 $0.105 \Omega/\text{km}$,正序感抗为 $0.39521 \Omega/\text{km}$,正序容抗为 $3.667 \times 10^{-11} \Omega/\text{km}$,零序电阻为 $0.315 \Omega/\text{km}$,零序感抗为 $1.1856 \Omega/\text{km}$,零序容抗为 $5.167 \times 10^{-11} \Omega/\text{km}$,负荷模型采用电压-频率模型,主要参数有 $P_0 = 50 \text{ MW}$, $Q_0 = 5 \text{ MVar}$, $V_0 = 35 \text{ kV}$ 。

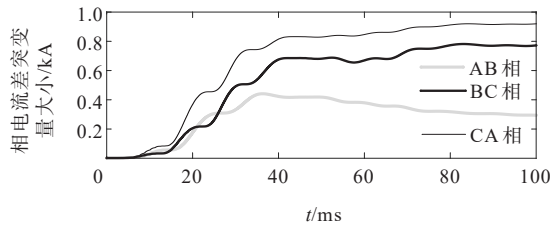
4.1 适应性分析验证

本文分别以A相金属性接地故障发生于距风机/光伏场站侧 $10, 50, 90 \text{ km}$ 处为仿真算例,以验证所提相电流差突变量选相元件适应性分析的正确性。

距新能源场站 10 km 处发生故障的仿真结果如图8所示,风机/光伏侧计算的正、负序电流分布系数分别为 $1.11 - j0.62$,储能侧计算的正序电流分布系数为 $-0.11 + j0.62$,储能侧计算得到正序电流分布系数的相位为 -100° ,正序电流分布系数的相角超出前述所分析的正确选相范围,AB、BC、CA相电流差突变量的大小分别为 $0.30, 0.76, 0.91 \text{ kA}$,根据相电流差突变量选相特征,C相被错误地选为故障相。



(a)正序电流分布系数相位

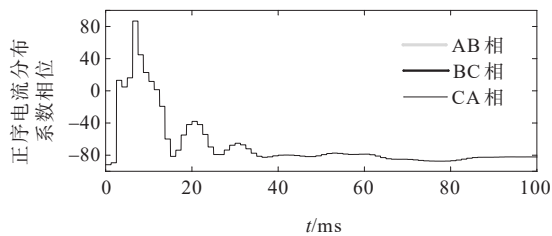


(b)相电流突变量变化

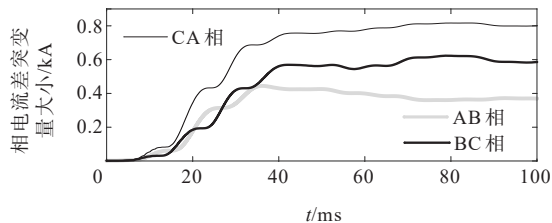
图 8 距新能源场站 10 km 处发生故障的仿真结果

Figure 8 Simulation results of fault occurring 10 km from new energy station

距新能源场站 50 km 处发生故障的仿真结果如图 9 所示,风机/光伏侧计算的正、负序电流分布系数为 $0.93-j0.5$,储能侧计算的正序电流分布系数为 $-0.07+j0.5$,储能侧计算得到正序电流分布系数的相位为 -87° ,正序电流分布系数的相位超出前述所分析的正确选相范围,AB、BC、CA 相电流差突变量的大小分别为 0.36、0.62、0.81 kA,根据相电流差突变量选相特征,C 相被错误地选择为故障相。



(a)正序电流分布系数相位



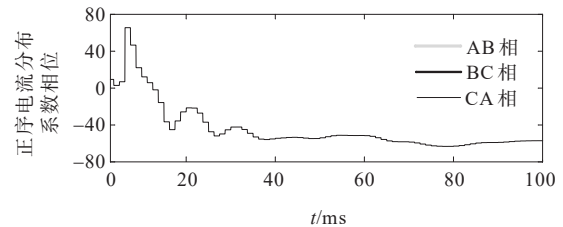
(b)相电流突变量变化

图 9 距新能源场站 50 km 处发生故障的仿真结果

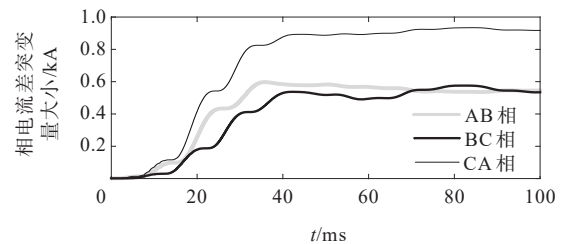
Figure 9 Simulation results of fault occurring 50 km from new energy station

距新能源场站 90 km 处发生故障的仿真结果如图 10 所示,风机/光伏侧计算的正、负序电流分布系

数为 $0.76-j0.42$,储能侧计算的正序电流分布系数为 $0.24+j0.42$,储能侧计算得到正序电流分布系数的相位为 -60° ,正序电流分布系数的相位处于正确选相的临界,AB、BC、CA 相电流差突变量的大小分别为 0.56、0.53、0.93 kA,根据相电流差突变量选相特征,A 相被正确地选为故障相。



(a)正序电流分布系数相位



(b)相电流突变量变化

图 10 距新能源场站 90 km 处发生故障的仿真结果

Figure 10 Simulation results of fault occurring 90 km from new energy station

由上述仿真可知,储能侧相电流差突变量选相元件在传统故障控制策略下无法正确选相,仿真验证了文 2 所述的拒动条件。其他故障类型由于受风机/光伏侧负序抑制的影响,也会出现相电流差突变量选相元件无法正确选相的情况,故不在此赘述。

4.2 新控制策略效果验证

本文设置 A 相接地故障在 3 s 时发生于风机/光伏侧母线出口 10 km 处,在 3 s 时风机/光伏侧投入正序电流突变量抑制控制策略,在 10 ms 内达到稳态。新能源场站出口处正序电流幅值及相位如图 11 所示。由图 11 可知,故障后风机/光伏电源出口馈出的故障电流仍然保持三相对称,所以风机/光伏侧逆变器投入正序电流突变量抑制控制并不会影响负序电流抑制的响应效果。故障前、后风机/光伏电源出口电流的幅值均保持在 1.17 kA 。故障前、后风机/光伏侧电源测得电流的相位一直保持在 $270^\circ \pm 5^\circ$ 。综上所述,风机/光伏侧逆变器采用正序电流突变量抑制控制策略,可有效控制故障后风机/光伏侧逆变电源馈出的故障电流的幅值和相位

与故障前保持一致,且不会影响逆变器的负序抑制控制策略,使风机/光伏侧的逆变器在线路发生不对称故障时既可达成预期的控制目标,又不会因为负序电流的存在而影响逆变器的控制性能。

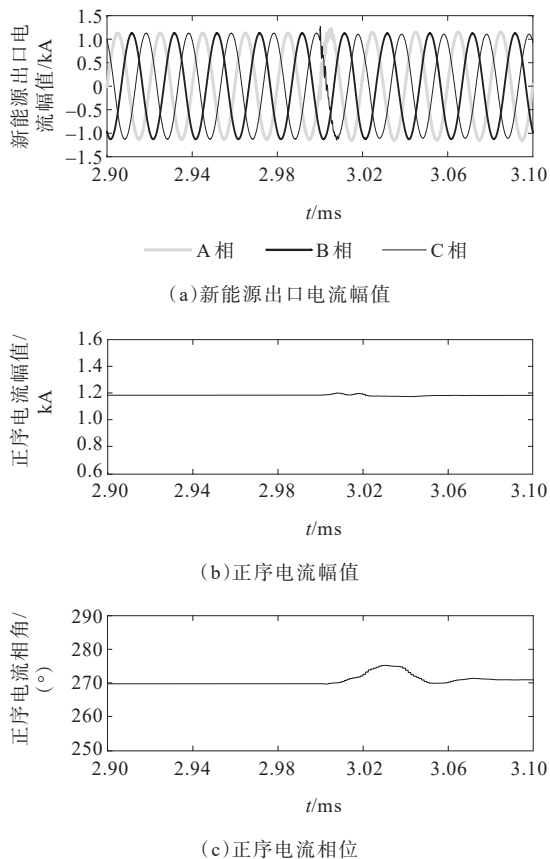


图 11 新能源场站出口处正序电流幅值及相位

Figure 11 Amplitude and phase of positive-sequence current at outlet of new energy station

经上述仿真验证可知,风机/光伏侧正序故障分量被抑制为0,投入的新控制策略达到预期目标。

4.3 新控制策略下不同故障类型的选相结果

本文设置了不同的故障类型以验证所提控制策略下保护方案的动作性能。

单相接地故障突变量选相元件的选相结果如图 12 所示,风机/光伏侧母线出口 10 km 处发生 A 相接地故障,各相间突变量 $|\Delta \dot{I}_{BC}|$ 、 $|\Delta \dot{I}_{AB}|$ 、 $|\Delta \dot{I}_{CA}|$ 分别为 0.002 4、0.579 0、0.581 0 kA, $|\Delta \dot{I}_{AB}| \approx |\Delta \dot{I}_{CA}|$ 且 $|\Delta \dot{I}_{BC}| \approx 0$,与同步机系统情况下相电流差突变量选相元件的选相性能一致。相电流差突变量大小关系为 $|\Delta \dot{I}_{BC}| \ll |\Delta \dot{I}_{AB}|$,且 $|\Delta \dot{I}_{BC}| \ll |\Delta \dot{I}_{CA}|$,根据 A 相接地故障的选相判据,储能侧选相元件可以准确地选出 A 相为故障相。

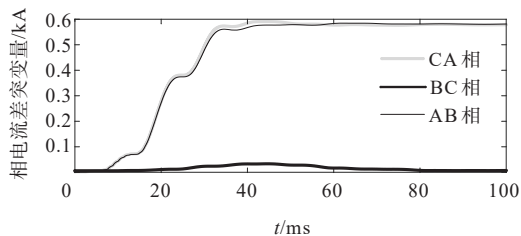


图 12 单相接地故障突变量选相元件的选相结果

Figure 12 Phase selection result of phase selection element for single-phase grounding fault mutation

相间故障突变量选相元件的选相结果如图 13 所示,风机/光伏侧母线出口 10 km 处发生 BC 相间故障,计算各相间突变量 $|\Delta \dot{I}_{BC}|$ 、 $|\Delta \dot{I}_{AB}|$ 、 $|\Delta \dot{I}_{CA}|$ 分别为 0.694、0.348、0.346 kA,与同步机系统情况下相电流差突变量选相元件的选相性能一致。相电流差突变量大小关系为 $|\Delta \dot{I}_{BC}| > |\Delta \dot{I}_{AB}|$,且 $|\Delta \dot{I}_{BC}| > |\Delta \dot{I}_{CA}|$,根据 BC 相间故障的选相判据,储能侧选相元件可以准确地选出 BC 相为故障相。

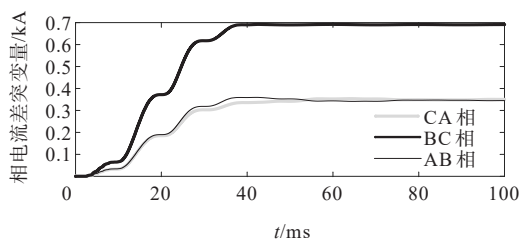


图 13 相间故障突变量选相元件的选相结果

Figure 13 Phase selection result of phase selection element for phase-to-phase fault mutation

三相故障突变量选相元件的选相结果如图 14 所示,风机/光伏侧母线出口 10 km 处发生三相故障,计算各相间突变量 $|\Delta \dot{I}_{BC}|$ 、 $|\Delta \dot{I}_{AB}|$ 、 $|\Delta \dot{I}_{CA}|$ 都为 0.90 kA,三者大小关系为 $|\Delta \dot{I}_{AB}| = |\Delta \dot{I}_{BC}| = |\Delta \dot{I}_{CA}|$,与同步机系统下相电流差突变量选相元件的选相性能一致。根据三相故障的选相判据,储能侧选相元件可以准确地选出 ABC 相为故障相。

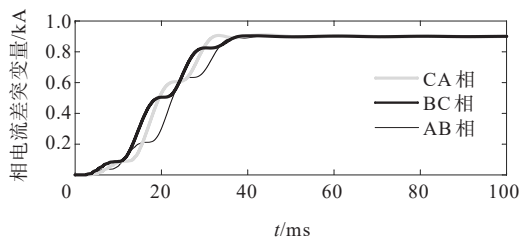


图 14 三相故障突变量选相元件的选相结果

Figure 14 Phase selection result of phase selection element for three-phase fault mutation

综上所述,当风机/光伏侧采用正序电流突变量抑制控制策略时,储能侧相电流差突变量选相元件在各种故障类型下均可以正确地选出故障相。

4.4 新控制策略下现有保护方案的可靠性验证

为验证现有保护方案的性能是否受所提新控制策略的影响,本文分别验证了纵联电流差动保护及相似度纵联保护方案(欧式距离、Tanimoto、余弦相似度)在所提控制策略下的动作性能。

本文以 BC 相间故障及 A 相接地故障发生于线路中点为例,定义制动电流与差动电流的比值为灵敏度,不同类型的故障电流差动保护的动作情况如图 15 所示。由图 15 可知,当发生 BC 相间故障时,C 相电流差动保护灵敏度为 0.67,低于制动系数 0.8,C 相保护拒动;当发生 A 相接地故障时,A 相电流差动保护灵敏度为 1.63,高于制动系数 0.8,保护可靠动作。综上所述,新控制策略下纵联电流差动保护的保护性能与传统控制策略下纵联电流差动保护的保护性能一致。

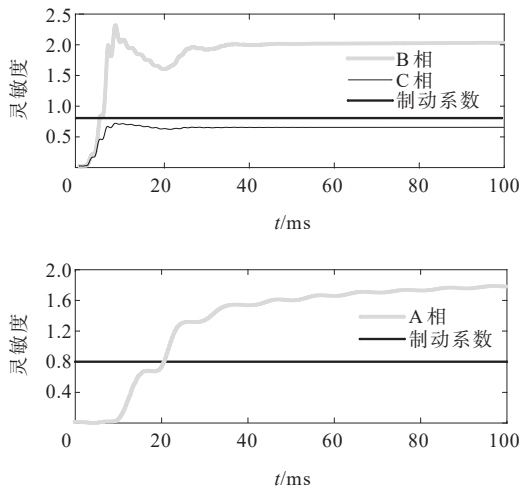


图 15 不同类型的故障电流差动保护的动作情况

Figure 15 Operating status of current differential protection for different types of faults

以 BC 相间故障发生于线路中点为例,区内故障时新控制策略下各方案的动作情况如表 1 所示。

表 1 区内故障时新控制策略下各方案的动作情况

Table 1 Operating status of each scheme for internal faults under new control strategy

线路	欧式距离		Tanimoto		余弦相似度	
	计算结果	动作情况	计算结果	动作情况	计算结果	动作情况
M 侧	32/34	✓	0.5/0.4	✓	0.81/0.85	✓
N 侧	32/34	✓	0.5/0.4	✓	0.81/0.85	✓

由表 1 可知,新控制策略下,基于波形相似度的纵联保护方案都能可靠识别区内故障,其保护性能不受本文所提控制策略影响。

5 结语

本文针对全比例新能源电网相电流差突变量选相元件的错误选相问题,提出了一种正序电流突变量抑制控制策略,解决了新能源控制策略对选相元件的影响,结论如下:

- 1) 分析了全比例新能源电网的故障特性,构建了故障时孤岛系统的故障分量网络,在此基础上分析了储能侧相电流差突变量选相元件的选相性能及拒动机理;
- 2) 利用控制策略与保护相配合,恢复了相电流差突变量选相元件的性能,营造了相电流差突变量选相元件的最佳工作场景,且不影响负序抑制控制策略的投入,保证了策略控制的性能;
- 3) 所提选相方案不需要对原有选相元件的判断进行更改,只需要短时间投入新控制策略,具有较强的适应性。

参考文献:

[1] 于群,国翠,曹娜,等.光伏电站对送出输电线路选相元件的影响研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(12):79-85.
YU Qun, GUO Cui, CAO Na, et al. Research of the photovoltaic plant influence on the outgoing transmission line phase selector[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 79-85.

[2] 陈实,邵能灵,范春菊,等.逆变器电源接入对选相元件的影响分析[J].电力系统自动化,2017,41(12):106-112+187.
CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Influence of inverter-interfaced generator on element of phase selectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 106-112+187.

[3] 李一泉,屠卿瑞,陈桥平,等.大型光伏电站对送出线路保护选相元件的影响[J].电网技术,2018,42(9):2976-2982.
LI Yiquan, TU Qingrui, CHEN Qiaoping, et al. Influence of large-scale photovoltaic power plant on phase-selection elements of line protections[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2976-2982.

[4] 沈枢,张沛超,方陈,等.双馈风电场故障序阻抗特征及对选相元件的影响[J].电力系统自动化,2014,38(15):87-92.
SHEN Shu, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al.

- Characteristics of sequence impedance of DFIG plant and influence on phase selector[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(15): 87-92.
- [5] 王晨清, 宋国兵, 刘凯, 等. 突变保护对风电接入系统的适应性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(31): 5485-5492.
WANG Chenqing, SONG Guobing, LIU Kai, et al. Adaptability analysis of fault component protection of power systems with wind farms[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(31): 5485-5492.
- [6] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 选相及方向元件在风电接入系统中的适应性分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(1): 89-95.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of phase selectors and directional relays in power systems integrated with wind farms[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(1): 89-95.
- [7] 马静, 王希, 王增平. 一种基于电流突变量的故障选相新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(19): 117-124+194.
MA Jing, WANG Xi, WANG Zengping. A new fault phase identification method based on phase current difference[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(19): 117-124+194.
- [8] 康涛, 翁汉琰, 林湘宁, 等. 考虑储能系统控保协同体系的光伏场站送出线路突变选相能力恢复策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(11): 4273-428.
KANG Tao, WENG Hanli, LIN Xiangning, et al. Phase selection capacity recovery strategy for transmission line of photovoltaic station based on the control and insurance cooperative of energy storage system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(11): 4273-428.
- [9] 黄涛, 陆于平. 适用于双馈风电场的改进电流突变选相元件[J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2959-2964.
HUANG Tao, LU Yuping. Improved superimposed current phase selector applied to DFIG-based wind farm [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2959-2964.
- [10] 黎钊, 吴宇奇, 郑宇超, 等. 基于控保结合的适配孤岛场景单相接地故障的新型距离保护方案[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(24): 9509-9522.
LI Zhao, WU Yuqi, ZHENG Yuchao, et al. A novel distance protection scheme for island grid based on control combined with protection under single-phase ground fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(24): 9509-9522.
- [11] 徐少华, 李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(34): 25-33+6.
XU Shaohua, LI Jianlin. Grid-connected/island operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 25-33+6.
- [12] 雷基林, 余林兴, 别玉, 等. 孤岛微电网能量管理系统研究综述[J]. *发电技术*, 2025, 46(2): 370-385.
LEI Jilin, YU Linxing, BIE Yu, et al. Review of energy management systems for islanded microgrids[J]. *Power Generation Technology*, 2025, 46(2): 370-385.
- [13] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [14] 张凡, 牟龙华, 王子豪, 等. 主从控制孤岛微电网的优化故障控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1241-1248+1414.
ZHANG Fan, MU Longhua, WANG Zihao, et al. Optimal fault control strategy of master-slave controlled islanding microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1241-1248+1414.
- [15] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(4): 555-561.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(4): 555-561.
- [16] 张建坡, 赵成勇, 敬华兵. 比例谐振控制器在 MMC-HVDC 控制中的仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(21): 53-62+193.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, JING Huabing. Simulating research of proportional resonant controllers in MMC-HVDC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(21): 53-62+193.
- [17] 张腾飞, 黎旭昕. 含光伏源的微电网孤岛/联网平滑切换控制策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(4): 904-910.
ZHANG Tengfei, LI Xuxin. A control strategy for smooth switching between island operation mode and grid-connection operation mode of microgrid containing photovoltaic generations[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(4): 904-910.
- [18] 钟显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(5): 47-54.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(5): 47-54.