

风光储一体化并网系统交流侧短路故障电流特性分析

程小平¹, 唐晓骏², 霍启迪²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 风光储一体化并网系统在电网中的渗透率越来越高, 但对风光储一体化并网系统影响短路电流机理认识尚不深入。分析了风光储一体化并网系统低电压穿越策略和无功功率补偿策略; 对交流侧的短路过程进行了研究, 电压跌落程度和限幅环节影响电流稳态幅值和相位。通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建风光储一体化并网系统模型, 理论分析并验证了场站内部汇集线、场站不同容量分配比例下等因素对短路电流的影响。

关键词: 风光储一体化并网; 系统低电压穿越; 交流侧短路; 短路电流

Analysis of short-circuit fault current characteristics on AC side of wind-PV-storage integrated grid connected system

CHENG Xiaoping¹, TANG Xiaojun², HUO Qidi²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The penetration rate of Wind-PV-Storage integrated grid connected system in the power grid is getting higher and higher, but the mechanism of its influence on the short-circuit current is still not deeply understood. The low-voltage ride through strategy and reactive power compensation strategy of Wind-PV-Storage integrated grid connected system is analyzed; the short-circuit process of AC side is studied, and it is found that the voltage sag degree and limiting link affect the steady amplitude and phase of current. Through the establishment of Wind-PV-Storage integrated grid connected system model in PSCAD/EMTDC, theoretical analysis and verification are carried out on the influence of factors such as the collection line inside the station and different capacity distribution proportion of the station on the short-circuit current.

Key words: wind-PV-storage integrated grid connected system; low voltage ride through; short circuit on AC side; short-circuit current

0 引言

近年来, 随着越来越多的风、光等新能源和储能电站的相继投运, 形成的风光储一体化并网系统在电网中的渗透率越来越高, 风光储一体化电场逐渐成为未来新能源场站发展的重要形式。

已有研究指出, 通过变流器并网的新能源、储能等电力电子系统会提高电网中的短路电流水平, 部分地区可能超过断路器开关额定容量, 致使局部电网的安全问题愈加凸显, 影响到电网的安全可靠性。目前文献[1]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[2]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[3-4]分析了光伏发电系统的并网逆变器结构及其控制策略。文献[5]研究了光伏并网接入点和接入容量对电力系统电压、网损和短路电流的影响。文献[6]研究了不同情况下光伏电源对配电网短路电流分布的影响。文献[7]分析了并网逆变器在配电网发生故障以及分布式光伏电源不同出力时输出电流的变化特性。文献[8]研究了不对称短路故障及不同限幅策略下电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)影响交流系统短路电流的机理。文献[9]提出了一种适用于短路故障分析的风电场动态等值建模方法。文献[10]建立了双馈风机短路电流计算模型。文献[11]分析了双馈风机不同机端电压跌落程度下的定子电流动态变化过程及表达式。文献[12]提出了一种考虑控制切换过程的双馈风电机组短路电流计算方法。可以看出各类研究主要针对风电场、光伏电站和储能电站等单一电力电子电源对交流系统短路电流的影响,而对于风光储一体化并网点短路电流的研究缺乏,相关影响因素、计算方法的研究不够深入。因此,研究其短路后的暂态过程和影响因素具有重要意义。

1 风光储一体化并网系统基本结构及工作原理

风光储一体化并网系统主要由风力/光伏发电系统、储能系统以及电网侧组成,整个系统中各电厂出口电压通过升压变压器升至35 kV并汇集,再连接至110 kV、330 kV系统,如图1所示。

光伏发电系统主要由太阳能电池和控制器组成,发电单元首先经过DC/DC斩波器进行电压变换,之后通过并网逆变器接入电网。在太阳能电池输出较大范围内变化时,并网逆变器始终以尽可能高的效率将太阳能电池输出的低压直流电转化成与电网相匹配的交流电送入电网。

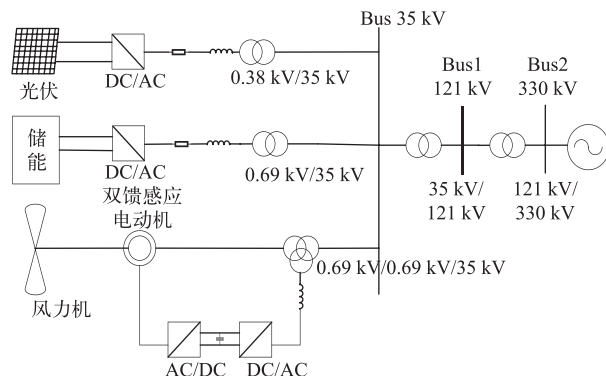


图1 风光储一体化并网系统结构图

Fig. 1 Structure of wind, solar, and storage integrated grid connection system

储能系统主要由储能电池和控制器组成,而控制器部分包含双向DC/DC变换器和电压源型变换器(Voltage Source Converter, VSC),同时该系统通过VSC接入电网。储能电池有充放电两种状态,VSC对应工作在整流状态和有源逆变状态,实现能量的双向流动和循环利用。

风力发电系统采用双馈风机,主要由风力机、齿轮箱、感应发电机、变流器以及控制系统组成,定子接电网或者直接接负载,通过在转子侧施加交流励磁来控制发电机的转矩。该系统中转子励磁变流器为关键部分,包含网侧整流器和转子侧逆变器。网侧整流器保证直流母线电压恒定,并且保证网侧功率因数为1;转子侧逆变器为双馈发电机提供交流励磁电流,以控制发电机实现风电机组的顺利并网。

风光储一体化并网系统正常工作状态下,风力发电系统的双馈风机变流器向转子侧提供励磁电流,配合发电机实现变速恒频运行,光伏发电系统经过并网逆变器接入电网,而储能系统对整个并网系统的功率输出起到调节作用。

2 不同电压跌落程度下风光储一体化并网系统的低电压穿越策略

2.1 光伏发电系统的低电压穿越策略与无功功率补偿策略

根据国家电网公司出台的《光伏电站接

入电力系统技术规定》^[13]中的要求，在电网发生故障时，光伏发电系统需要满足低电压穿越要求。如图2所示。当光伏电站并网点电压跌落至0时，光伏电站应能不脱网连续运行0.15 s；当跌落至曲线以下时，光伏电站可以从电网切出。

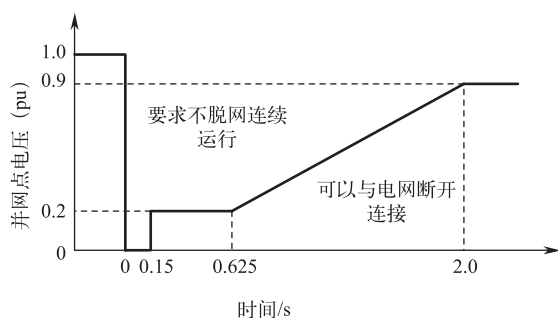


图2 光伏电站的低电压穿越能力要求

Fig. 2 Requirements for low voltage ride through capability of the photovoltaic power station

当发生故障引起电压跌落时，光伏电站注入电网的动态无功电流应满足以下要求

$$I_{PVT} = \begin{cases} 1.6 \times (0.9 - U_{PVrms}) I_{PVN} & (0.2 \leq U_{PVrms} \leq 0.9) \\ 1.05 I_{PVN} & (U_{PVrms} < 0.2) \\ 0 & (U_{PVrms} > 0.9) \end{cases} \quad (1)$$

式中， U_{PVrms} 为光伏电站并网点电压； I_{PVN} 为光伏电站额定电流。

2.2 储能系统的低电压穿越策略与无功功率补偿策略

GB/T 34120—2017《电化学储能系统储能变流器技术规范》^[14]中指出，电力系统发生故障时，储能变流器需要满足低电压穿越（Low Voltage Ride Through, LVRT）要求，如图3所示。

在图3中，正常运行时储能系统并网点电压最低为额定电压的85%。随着网侧电压跌落程度的变化，要求在曲线以上时储能系统继续并网运行，在曲线以下时储能系统从电网切出。同时在不同的电压跌落程度下，允许储能系统运行时间不相同；当电压跌落0.2（pu）以下时，允许运行时间小于0.15 s；电压跌落0.2~0.85（pu）时，允许运行时间小于2 s。

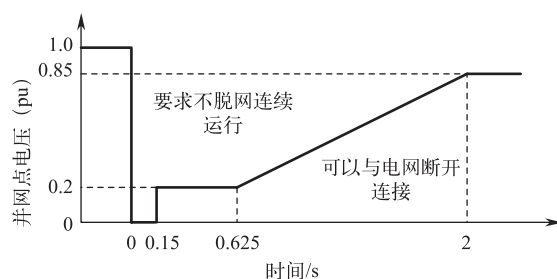


图3 储能电站的低电压穿越能力要求

Fig. 3 Requirements for low voltage ride through capability of energy storage power station

储能系统也具备一定的动态无功支撑能力，当电网发生短路故障引起电压跌落时，储能系统变流器注入电网的动态无功电流应满足以下要求

$$I_{BESST} = \begin{cases} 1.6 \times (0.85 - U_{BESSrms}) I_{BESSN} & (0.2 \leq U_{BESSrms} \leq 0.85) \\ 1.04 I_{BESSN} & (U_{BESSrms} < 0.2) \\ 0 & (U_{BESSrms} > 0.85) \end{cases} \quad (2)$$

式中， I_{BESSN} 为储能系统变流器额定电流； $U_{BESSrms}$ 为储能系统并网点电压。

2.3 风力发电系统的低电压穿越与无功功率补偿策略

GB/T 19963.1—2021《风电场接入电力系统技术规定》^[15]对风电场应具备的故障穿越能力提出了明确要求，如图4所示。风电场并网点电压跌落至标称电压的20%时，风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行0.625 s，同时若风电场并网点电压在发生跌落后2 s内能够恢复到标称电压90%时，风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行。

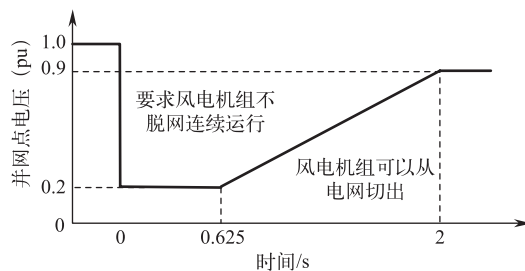


图4 风电场低电压穿越能力要求

Fig. 4 Requirements for low voltage ride through capability of wind farm

该规定中也对风电机组的动态无功支撑能力提出了要求，当电力系统发生三相短路故障，且

并网电压低于标称电压的90%时,风电场应具有动态无功支撑能力,其次风电场动态无功增量响应并网电压变化,并满足如下要求

$$\Delta I_T = K \times (0.9 - U_N) \times I_N \quad (0.2 \leq U_N \leq 0.9) \quad (3)$$

式中, ΔI_T 为风电场注入的动态无功增量; K 为风电场动态无功电流比例系数,取值范围在1.5~3之间; U_N 为风电场并网电压标么值; I_N 为风电场额定电流。

此外,电压跌落期间,风电场向电力系统输出的无功电流应为电压跌落前正常运行时的输出无功电流与动态无功电流 ΔI_T 之和,风电场无功电流的最大输出能力应不低于风电场额定电流的1.05倍。

经过以上分析,风光储一体化并网系统的低电压穿越策略如图5所示。

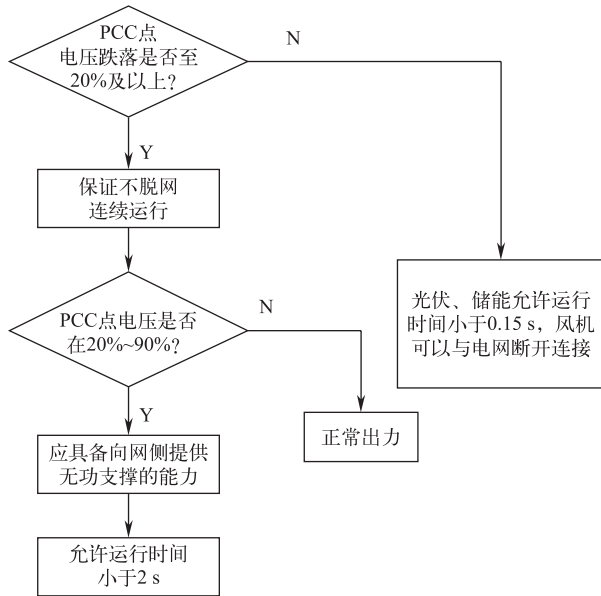


图5 风光储一体化并网系统低电压穿越策略流程图

Fig. 5 Flow chart of low-voltage ride-through strategy for wind-solar storage integrated grid-connected system

由图5可以看出,当并网点电压跌落至20%以下时,光伏发电系统和储能系统允许运行时间小于0.15 s,风电机组可以与电网断开连接;当并网点电压跌落至0.2~0.9 (pu) 时,风电机组、光伏发电系统和储能系统处于不同的无功处理状态,此时允许运行时间小于2 s;当并网点电压恢复至0.9 (pu) 时,三者正常出力。

3 交流侧短路过程影响因素分析

3.1 场站内部汇集线对短路电流的影响

短路点距离电气设备的远近主要由短路阻抗决定,而短路阻抗主要受到站内汇集线的影响。在发生短路故障时,汇集线直接影响到电气设备的电压跌落程度,从而触发不同的低电压穿越策略。站内电气设备感受到轻微电压跌落时,换流器按照稳态控制策略运行,此时风光储一体化并网系统输出电流参考值 i_{ref} 与有功、无功电流参考值 $i_{d\text{ref}}$ 、 $i_{q\text{ref}}$ 有如下关系

$$\begin{cases} i_{\text{ref}} = \sqrt{i_{d\text{ref}}^2 + i_{q\text{ref}}^2} \\ i_{\text{ref}} \leq i_{\text{max}} \\ i_{d\text{ref}} \leq i_{d\text{max}} \\ i_{q\text{ref}} \leq i_{q\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

在此情况下,风、光、储设备控制器有着不同的限流方式,常见的有等比例限流、有功优先和无功优先等方式。不同的限流方式中,有功、无功电流参考值比例将导致电流参考值 i_{ref} 同参考相位(即交流电压相位)的相角差不同。如图6所示,无功电流参考值所占比例越大,电流参考值超前 d 轴角度越大。这意味着风光储一体化并网系统输出的短路电流与交流系统所提供的短路电流之间的夹角会变小,从而使得短路点短路电流增加。

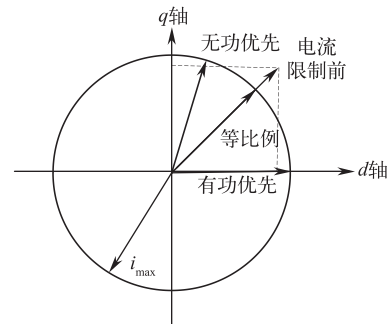


图6 不同限幅下短路电流相位关系

Fig. 6 Phase relationship of short-circuit current under different amplitude limits

随着电压跌落程度的加深,控制器外环闭锁,此时由LVRT策略直接给定 d 、 q 轴电流参考值。当电压跌落更为严重时,闭锁换流器 d 轴电

流指令，内环电流参考值直接给定，全部输出无功电流，若150 ms之后故障仍然存在，可断开与交流系统的连接。

以交流电压为参考相位，短路电流相位关系如图7所示。在实际系统中，由于风光储一体化系统提供的短路电流 (I_{WPB}) 远远小于交流系统短路电流 (I_{KAC})，因此同 I_{KAC} 接近垂直的风光储提供的有功电流分量 (i_d) 影响较小，无功电流分量 (i_q) 起着主要影响作用。

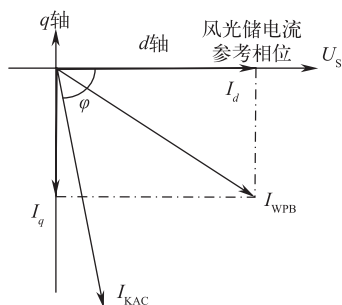


图7 短路电流相位关系

Fig.7 Phase relation of short-circuit current

以风电场额定容量50 MW、光伏电站额定容量20 MW和储能电站额定容量30 MW为例，在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建风光储一体化并网模型，研究PCC发生三相短路故障下，站内汇集线对短路电流的影响，近区故障结构示意图如图8所示。

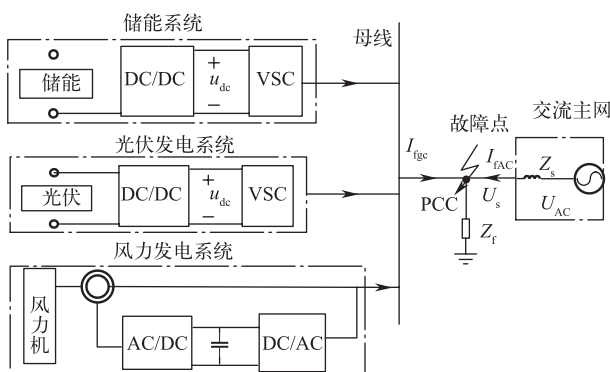


图8 风光储一体化并网系统交流侧近区故障结构图

Fig.8 Fault structure diagram of AC side near area of integrated wind, solar and storage grid-connected system

设置2 s时PCC处发生三相短路故障，不同电压跌落程度下汇集线输出的短路电流 I_{fg} 波形如图9所示，以A相电流为例。

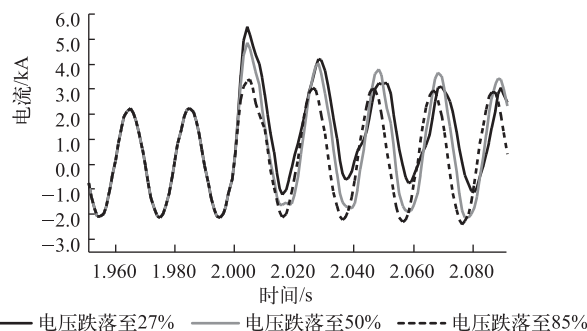


图9 不同电压跌落程度下35 kV汇集线处A相电流瞬时值

Fig.9 Instantaneous value of phase A current at 35 kV collector line under different voltage sags

通过调整35 kV汇集线左侧馈线上的线路等效阻抗影响故障后设备的电压跌落程度。从图9中可以看出，汇集线处短路电流在2.004 s时到达峰值，不同电压跌落程度下到达峰值时间相同，电压跌落至85%时，电流波形峰值最小，为3.29 kA。而随着电压跌落程度的加深，跌落至50%时，电流波形幅值略有增加，达到了4.77 kA；当跌落至27%时，电流波形幅值较前两者更大，达到了5.41 kA。同时可以看到，在到达稳态时，随着电压跌落程度的加深，电流波形相位发生了改变，电压跌落程度越大，电流相位越超前。

综上所述，随着设备电压跌落程度的不同，触发不同的低电压穿越保护策略，使有功电流分量和无功电流分量发生改变，无功电流分量会随着电压跌落程度的加深而随之增加，导致汇集线处短路电流幅值增加和相位发生改变，严重时，电流波形幅值上升比例高达64%。

3.2 场站内部设备容量对短路电流的影响

光伏在有功、无功解耦控制方式下运行时，可通过潮流计算求解其输出电流；而在故障后稳态阶段，光伏输出电流通常为额定输出电流的1~1.2倍，储能同理。即故障前后的输出电流计算公式为

$$\begin{cases} I_0 = \frac{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}{\sqrt{3}U_{PV}} \\ I_1 = K_{\max} \frac{S_{PVN}}{\sqrt{3}U_{PVN}} \end{cases} \quad (5)$$

式中， I_0 、 I_1 分别为故障前光伏输出电流、故障

后稳态阶段输出电流； P_0 、 Q_0 分别为故障前光伏向交流系统输送的有功功率、无功功率； U_{pV} 为光伏输出电压； K_{max} 为限幅倍数； S_{pVN} 为光伏额定容量； U_{pVN} 为光伏额定输出电压。

由式（5）可见，故障前光伏和储能输送的功率直接影响故障后其输出电流的初始值；故障后稳态阶段光伏和储能输出电流满足限幅约束，限幅倍数越大，其输出电流越大；在相同的限幅倍数下，光伏和储能额定容量越大，故障后其输出电流越大。

相较于储能和光伏，发生故障时双馈风机输出的短路电流成分复杂，由直流分量、交流分量、谐波衰减分量和衰减的转差频率分量组成，使得双馈风机输出的短路电流在达到峰值后随着时间衰减，故障后稳态值增量和容量不成正比。在场站总输出容量不变的情况下，改变风力、光伏和储能系统的容量，论证场站不同类型设备容量比例对短路电流的影响，见下表。

表 风光储一体化并网系统不同容量比例

Tab. Different capacity proportions of wind-PV-storage integrated grid connected system

(单位: MV·A)

组合	1	2	3
储能	30	30	30
光伏	60	40	20
风电	10	30	50

为验证上述分析，在PSCAD/EMTDC上设置2 s时PCC处发生三相短路故障。组合1风电场（10 MW）、光伏电站（60 MW）、储能电站（30 MW）以及35 kV汇集线处输出A相电流瞬时值波形如图10所示。

由图10可知，发生故障后，风电场、光伏电站、储能电站以及汇集线处输出的短路电流在2.004 s时到达峰值，峰值电流依次为0.65 kA、1.77 kA、1.02 kA和3.46 kA，随后表现各不相同。风电场和汇集线处的短路电流在故障期间一直在衰减；而光伏电站输出短路电流在到达峰值后，电流幅值下降到1.46 kA，然后保持不变；储能电站在故障发生后，电流幅值为1.18 kA且保持不变。

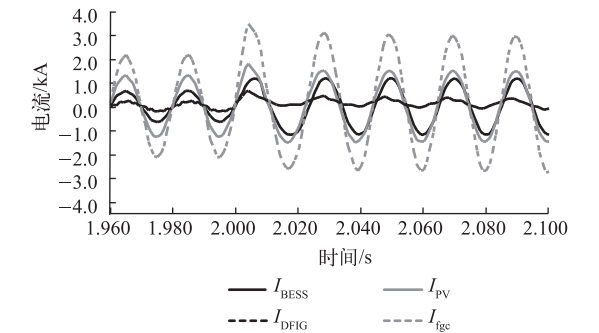


图 10 组合1风、光、储及35 kV汇集线处A相电流瞬时值
Fig. 10 Instantaneous value of phase A current at the air, optical, storage, and 35 kV collector line of combination 1

由于光伏电站和风电场输出短路电流到达峰值时间相同，储能电站输出短路电流幅值不变，通过改变光伏电站和风电场的容量来探究其对汇集线处短路电流的影响。在PSCAD/EMTDC上设置2 s时PCC处发生三相短路故障，三种组合下汇集线处输出A相短路电流 I_{fgc} 如图11所示。

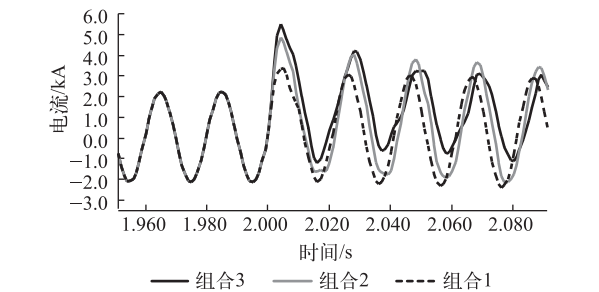


图 11 三种组合下35kV汇集线处短路电路电流
Fig. 11 Instantaneous value of phase A current at 35 kV collector line under three combinations

从图11可以看出，在系统总容量不变的情况下，故障前汇集线输出的电流不变，随着风电场容量的增加，汇集线输出的短路电流峰值随之增加。当风电场容量由10 MW增加到30 MW时，短路电流峰值由3.44 kA增加到4.14 kA；当风电场容量增加到50 MW时，短路电流幅值增加到4.79 kA，短路电流幅值分别上升了20%和16%。可见随着风电场容量的不断增加，短路电流幅值上升幅度减小，但仍然会增大短路电流幅值。因此在整个场站容量不变的情况下，双馈风机不宜投入过多，合理分配光伏、双馈风机和储能设备比重，能够降低汇集线处的短路电流。

4 结束语

本文分析了在风光储一体化并网系统交流侧发生短路故障时，不同电压跌落程度下的低电压穿越与无功功率补偿策略，研究了场站内部汇集线及场站不同总容量分配比例对短路电流的影响。得出如下结论：

1) 故障期间，风光储汇集线输出短路电流分量与交流系统所提供短路电流分量之间相位差主要受风光储的无功支撑能力影响，无功支撑能力越大，两电流叠加后短路电流幅值越大；反之，短路电流幅值越小。

2) 汇集线距离的长短，直接影响到风光储设备的电压跌落程度，从而决定是否触发和进入低电压穿越保护策略，使得有功电流分量和无功电流分量发生改变，导致汇集线处短路电流幅值增加和相位发生改变。

3) 在系统总容量不变的情况下，双馈风机所占比例越大，风光储一体化并网系统输出的短路电流幅值越大。

本文针对进一步分析风光储一体化系统并网系统存在的问题提供了一定研究基础，今后仍需从其他方面对风光储一体化系统交流侧故障后对短路电流的影响和贡献做深入研究。

参考文献

- [1] 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): 1-9.
- [2] 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.
- [3] 赵伟然, 李光辉, 何国庆, 等. 光伏电站经 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 41-45.
- [4] 张超, 何湘宁. 短路电流结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006(20): 98-102.
- [5] 彭生江, 陆军, 张中丹, 等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021,

49(5): 157-164.

- [6] 刘晓. 分布式光伏电源对城市配网短路电流分布情况的影响[J]. 电工技术, 2017(5): 166-167.
- [7] 刘健, 林涛, 同向前, 等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2080-2085.
- [8] 霍启迪, 唐晓骏, 马世英, 等. 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[J]. 电力自动化设备, 2022(3): 153-160.
- [9] 薛翼程, 张哲任, 徐政. 适用于短路故障分析的风电场动态等值建模方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 327.
- [10] 尹俊, 毕天姝, 薛安成, 等. 计及低电压穿越控制的双馈风力发电机组短路电流特性与故障分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 116-125.
- [11] 郑涛, 李娟, 杨国生. 计及不同电网电压跌落程度的双馈风力发电机组定子电流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 81-87.
- [12] 刘天阳, 张玉红, 王蒙, 等. 考虑控制策略切换过程的双馈风力发电机组短路电流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3330-3338, 3659.
- [13] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S].
- [14] 电化学储能系统储能变流器技术规范: GB/T 34120—2017[S].
- [15] 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].

作者简介

程小平(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子化电力系统短路电流分析理论与方法。

唐晓骏(1979—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。

霍启迪(1991—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。

(收稿日期: 2023-01-17)