

新能源送出系统基于 SVG 缺相控制的暂态过电压抑制方法

王晨星^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 彭 珑^{1,2}, 刘羿辰^{1,2}, 王 聪³

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司 北京 100045; 2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045;
3. 国家电网公司华北分部, 北京 100053)

摘要: 针对新能源集中送出系统的人工接地短路试验和仿真结果表明, 风电、光伏汇集线路发生单相瞬时接地故障后, 系统在故障相分闸至重合期间存在暂态过电压, 并已成为制约新能源送出能力的主要因素之一。文中基于对典型新能源集中送出工程暂态过电压的仿真计算和人工接地短路试验结果, 分析了汇集线路故障发生及清除后暂态过电压的阶段性特征及其产生机制; 研究了静止无功发生器 (static var generator, SVG) 在原有控制策略下的无功响应情况与系统过电压情况的关联性, 分析了原有策略的缺陷; 进而从动作逻辑和判断条件角度提出了 SVG 装置无功控制策略的优化调整方法, 并通过对比仿真验证了优化策略的合理性及有效性。结果表明: 通过增加 SVG 缺相控制, 以系统缺相运行期间三相电压不平衡特征作为该模式进出判据, 能够在不影响已有低压/高压故障穿越控制模式的前提下, 使 SVG 正确判断和迅速响应进入或退出缺相模式; 并且通过将缺相模式下 SVG 无功响应值设定为一较低恒定值, 能够显著降低新能源送出系统暂态过电压水平。

关键词: 新能源送出系统; 暂态过电压; 静止无功发生器; 控制策略; 电压不平衡

Research on Suppression Strategy of Transient Overvoltage in New Energy Transmission System Based on Open-phase Control of SVG

WANG Chenxing^{1,2}, LI Pengfei^{1,2}, PENG Long^{1,2}, LIU Yichen^{1,2}, WANG Cong³

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China; 2. Electric Power Research Institute, Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China; 3. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

Abstract: According to the results of artificial earthing experiment and simulating calculation, it is suggested that the transient voltage after single-phase transient fault has been a main restraining factor of power delivery capacity in new energy transmission system. In this paper, the periodical characteristics and mechanism of the transient voltage caused by single-phase fault was analyzed based on simulating calculation of a typical new energy transmission system. The relationship between transient overvoltage with SVG reactive power response was analyzed. Furthermore, the defect of exiting control strategy was revealed. From the perspective of operation logic and judging criterion, the optimization method of SVG control strategy, which was verified by simulating calculation, was proposed. Based on the analysis, the open-phase control mode of SVG is set in order to suppress the transient overvoltage after single-phase earthing fault. The unbalance of three phase voltage in SVG terminal can be used as the entering and exiting criteria of the open-phase mode. By maintaining the reactive current of SVG in a low level during open-phase operation, the transient overvoltage can be effectively suppressed.

Key words: new energy transmission system; transient overvoltage; static var generator; control strategy; voltage unbalance

0 引言

随着国家“沙戈荒”大型新能源基地的建设, 大规模风电、光伏直接汇集到 500 kV 汇集站或火电厂再经百公里以上长线路送至主网已经成为新能源送出的重要形态^[1-3]。在电网愈来愈呈现“高比例可再生资源、高比例电力电子设备”特点的背景下, 大规模新能源汇集基地由于与主网联系通道较为薄弱、系统支撑弱, 使得电力系统安全稳定运行面临

多项挑战——这其中, 暂态过电压问题逐日凸显, 已经成为制约新能源输送能力的关键因素之一^[4-10]。以华北地区锡盟新能源集中送出系统为例, 实际运行中发现新能源送出线路故障发生及清除后, 从汇集站 500 kV 母线至新能源机端存在明显暂态过电压现象, 并且研究表明暂态过电压呈现随新能源出力增加而愈加严重的趋势^[11-13]。截止 2022 年 12 月, 锡盟系统新能源装机总量约 7 250 MW, 考虑后续装机增容计划, 至 2023 年底该地区风电、

基金项目: 国家电网公司华北分部科技项目(1100/2022-02001B)。

Project Supported by Science and Technology Project of North China Branch of SGCC(1100/2022-02001B).

光伏总装机将增加至约 11 000 MW，暂态过电压问题可能进一步加剧，从而制约新能源送出上限。

目前，针对新能源送出系统暂态过电压问题研究主要集中在以下方面：在机理及判据方面，文[13]针对新能源机组及无功补偿装置在低电压故障发生及清除过程中的无功响应情况展开研究，分析了上述设备增发容性无功导致系统产生无功盈余进而引发暂态过电压的过程。文[14]分析了电网不对称故障下直驱永磁风机功率响应导致电网电压负序分量出现的过程，并指出该过程是致使新能源送出功率波动及暂态过电压等问题的直接原因之一。文[15]针对新能源送出系统单相断线运行期间的三相电压不平衡问题进行分析，半定量地研究了非全相运行期间负序及零序电压的规律及其与故障相电压抬升的关系。文[16]针对新能源送出系统各电压等级过电压运行限值进行分析，提出将避雷器短时工频耐受时间特性作为系统暂态过电压的判据。

在抑制方法方面，静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM)、SVG 等装置通过自换相的电力半导体桥式变流器来进行无功功率的动态补偿，在维持新能源场站电压稳定、抑制新能源送出系统暂态过电压方面扮演了重要角色。其中，SVG 响应速度较快、控制精度较高，并且由于其具有成本相对较低、可靠性高和易于安装维护等优点，因此在华北电网“沙戈荒”新能源基地中有十分广泛的应用。以锡盟新能源集中送出工程为例，已投 36 座风电场均在升压变低压 35 kV 侧配置了 SVG。在此背景下，SVG 在电网故障期间的响应特性及其对暂态过电压的影响已经成为重点研究方向之一。文[17]分析了 SVG 响应时间对新能源场站暂态电压的影响，提出无功补偿装置无功调节的滞后性是导致暂态过电压产生甚至引发机组脱网的主要因素之一。文[18]研究了无功补偿方式与系统出现甩负荷故障时暂态过电压的关联性，提出风电机组及无功补偿装置保护定值及其动作策略是影响暂态过电压的主要因素。文[19]指出新能源场站无功补偿装置的无功控制模式能够导致无功功率/电压灵敏度增大，可能引发暂态过电压问题，甚至导致新能源高电压连锁脱网事故。文[12]以青豫直

流系统为对象，分析了直流系统换相失败后，交流电压迅速从低电压过渡到高电压，由于 SVG 装置的控制滞后，导致其在系统低压时发出的大量无功功率无法快速从发无功状态转为吸无功状态，进而引发在助增系统过电压的问题。

文中基于新能源送出系统人工接地短路试验实测及仿真分析，分析了暂态过电压特征及规律；根据典型新能源送出场景仿真计算结果，明确了暂态过电压发展过程与 SVG 装置无功响应动态过程的关系；进而指出了目前 SVG 装置无功控制策略存在的风险及问题，并提出了策略优化和完善方法；最后结合新能源送出工程实例验证了优化策略对暂态过电压的抑制效果。

1 新能源暂态过电压“两阶段”特征及其机制

1.1 新能源集中送出典型方式

以华北电网为例，新能源集中送出系统典型方式见图 1。图 1 中，风电、光伏经 35 kV 集电线路送至新能源升压站，各升压站通过 220 kV 送出线路将各场站新能源接入 500 kV 汇集站 220 kV 侧，最终送出至电网侧。基于以上新能源送出方式，分析暂态过电压时主要考虑 500 kV 或 220 kV 线路单相接地故障发生及清除后新能源场站或汇集站母线电压变化情况。结合工程实际单瞬故障后保护动作时序，仿真分析时线路故障动作时序如下：

1) t_0 时刻，500 kV 线路汇集站侧(或 220 kV 线路风场侧)发生单相接地故障，线路上单相接地故障持续时间取 500 ms。

2) t_1 时刻，线路近故障侧故障相单相跳闸； t_1 后 10 ms，线路远故障侧故障相单相跳闸。考虑工程实际保护动作跳闸情况， t_1 可取 t_0 时刻后 40 ms。

3) t_2 时刻，故障线路两侧故障相单相重合。参考华北电网单相重合闸时间设置情况， t_2 最长可取 t_1 时刻后 1 200 ms。

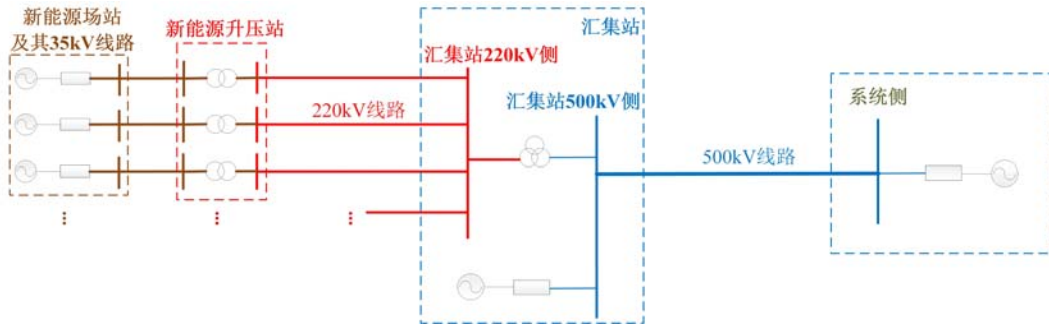


图1 新能源集中送出系统典型结构简图

Fig. 1 Simplified structure diagram of typical new energy centralized transmission system

1.2 暂态过电压仿真及试验波形特征

以华北电网锡盟风电集中送出系统为对象，通过人工接地短路试验监测 500 kV 送出线路单瞬故障后汇集站 500 kV 母线电压变化，并通过仿真计算对试验结果进行了验证，结果见图 2。由图 2 可见，故障相切除至重合期间，汇集站 500 kV 母线电压存在暂态过电压。试验监测及仿真计算结果均表明，该暂态过电压呈明显的“两阶段”特征：

1) 第一阶段为缺相运行暂态阶段，即故障相切除时刻起至其后 100 ms 内，该阶段故障相母线电压通常在 1.3 p.u. 以上(系统最高运行相对地电压为基准，即 $1 \text{ p.u.} = \sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$ ， U_m 为系统最高运行电压，下文相电压均以此为基准)，并近似呈工频衰减；

2) 第二阶段为缺相运行稳态阶段，即故障相切除后 100 ms 左右至故障相重合期间，该阶段故障相母线电压基本维持稳定，系统处于单相分闸稳态运行，三相电压呈明显不平衡，直至故障相重合。

(b) 仿真计算结果

图2 锡盟风电集中送出系统 500 kV 线路单瞬故障后汇集站侧 500 kV 母线变化

Fig. 2 Voltage variation of 500 kV bus in one collecting station of Ximeng new energy transmission system during single-phase transient fault

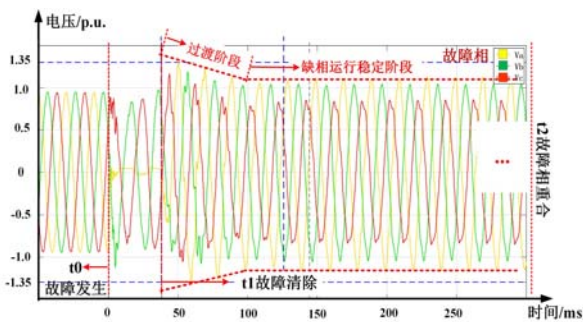
1.3 新能源场站无功响应特性影响

故障发生及清除后，暂态过电压“两阶段”特征与新能源机组及 SVG 装置的无功响应情况密切相关，两者的关联性见图 3。图 3 中：

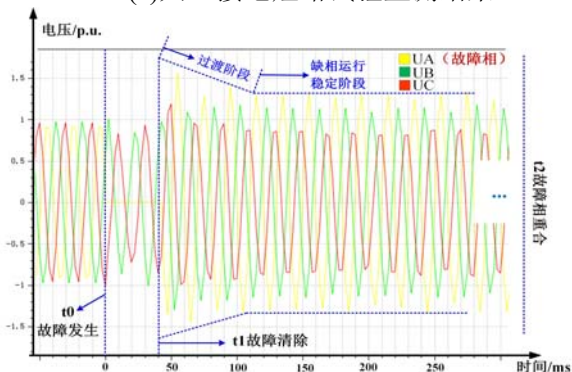
1) 系统单相接地故障期间，机组及 SVG 装置通常由于机端正序电压降低进入低电压穿越模式而增发无功。

2) 故障相切除后，系统进入缺相运行阶段，并且由于机组及 SVG 装置响应延时，导致其不会在切除时刻马上进入稳态，而存在无功过剩的暂态阶段。暂态阶段持续时间取决于机组及 SVG 装置的进入/退出故障穿越模式延时及计算延时。考虑工程实际情况，SVG 进入/退出故障穿越的响应延时均可按 20~40 ms 考虑，基波正序电压计算延时为 10 ms，因此总延时一般约 50~90 ms，即可认为暂态阶段持续时间在 100 ms 内。人工接地短路试验中线路单瞬故障后场站无功响应情况见图 4。由图 4 可以看出，故障相切除后，场站无功在到达近似稳态之间，存在 60~70 ms 的暂态阶段，该阶段持续时间与图 2 中过电压暂态阶段基本一致。

3) 随着场站无功回落，故障相电压逐渐衰减直至稳态。进入缺相运行稳定阶段后，由于各相负序和零序电压的大小及其与正序电压的相对相位关系不同，导致三相电压不平衡，并且至少有一相电压偏高。锡盟 500 kV 线路单瞬故障切除且系统进入缺相运行稳态阶段后，仿真计算得到汇集站 500 kV 侧三相电压及其序分量，见表 1，并进而得到缺相运行稳态阶段三相电压矢量图见图 5。由表 1 及图 5 可见，在系统缺相运行稳态阶段，A 相电压升高，



(a) 人工接地短路试验监测结果



因为其正序分量 $U_{A(1)}$ 与负序 $U_{A(2)}$ 及零序分量 $U_{A(0)}$ 近似呈 90° ; B 相电压升高, 主要因为其正序分量 $U_{B(1)}$ 与负序 $U_{B(2)}$ 呈锐角约 31° ; C 相电压降低, 主要因为其正序分量 $U_{C(1)}$ 与负序分量 $U_{C(2)}$ 呈钝角约 151° 。

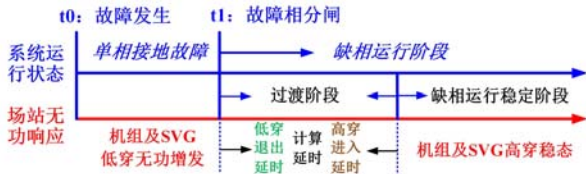


图3 新能源线路单相接地故障发生及清除后系统运行状态与场站无功响应情况关联性示意

Fig. 3 Schematic diagram of relevancy between system operation status and reactive response of new energy station after single-phase earthing fault

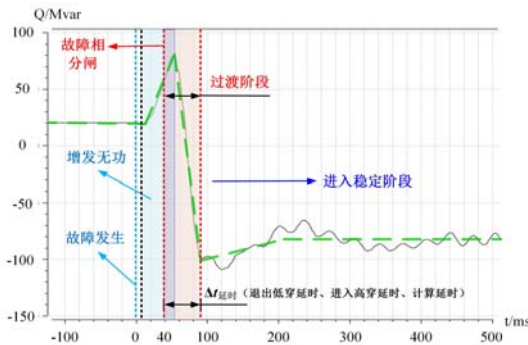


图4 汇集线路单瞬故障后风电场无功变化

Fig. 4 Variation of reactive power of wind farm after single phase earthing fault

表1 系统缺相运行稳态阶段 500 kV 母线电压

Table 1 Phase voltages of 500 kV bus of the collecting station during open-phase operation

电压	幅值标么值/p.u.	相位/($^\circ$)
U_{Aint}	1.00	$\angle 2.8$
U_A	1.21	$\angle 46.8$
$U_{A(1)}$	1.14	$\angle 28.7$
$U_{A(2)}$	0.26	$\angle 117.8$
$U_{A(0)}$	0.15	$\angle 117.8$
U_{Bint}	1.00	$\angle -117.2$
U_B	1.13	$\angle -101.9$
$U_{B(1)}$	1.14	$\angle -91.3$
$U_{B(2)}$	0.26	$\angle -122.2$
$U_{B(0)}$	0.15	$\angle 117.8$
U_{Cint}	1.00	$\angle 122.8^\circ$
U_C	0.87	$\angle 137.4^\circ$
$U_{C(1)}$	1.14	$\angle 148.7^\circ$
$U_{C(2)}$	0.26	$\angle -2.2^\circ$
$U_{C(0)}$	0.15	$\angle 117.8^\circ$

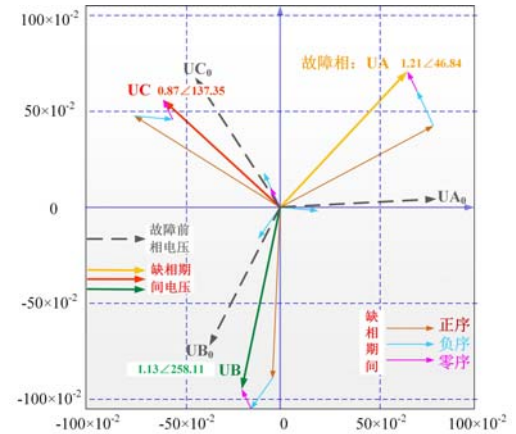


图5 系统缺相运行稳态阶段汇集站 500 kV 母线三相电压矢量

Fig. 5 Three phase vector of 500 kV bus of the collecting station during open-phase operation

2 原有策略下 SVG 装置无功“反调”问题

根据上一章节分析, 新能源送出线路故障发生及清除后至故障相重合的系统缺相运行期间, 汇集站母线至少有一相电压偏高。进一步地, 由于现行标准^[20]未对不对称故障下新能源场站的高电压穿越要求做出规定, 大部分新能源场站在并网前进行电磁暂态建模时, 并未校验单相接地故障后响应情况, 导致了 SVG 装置存在在系统缺相运行期间仍增发无功的无功“反调”现象, 加剧了系统缺相运行期间的暂态过电压水平。目前, SVG 装置无功“反调”问题在华北电网新能源送出工程中普遍存在, 为降低系统暂态过电压水平以满足并网需求, 通常采取退出线路单相重合闸的临时措施, 导致单瞬故障后新能源送出线路必然三相跳闸, 从而大大降低了新能源场站对电力供应的稳定性。

2.1 SVG 原有无功控制策略

以华北电网锡盟风电集中送出系统中某 500 kV 汇集站及其下风电场送出工程为例, 工程投产的两座 220 kV 风电场装机容量分别为 550、450 MW, 并分别配置 6 台 ± 63 Mvar SVG 装置(风电场 A, 550 MW)和 4 台 ± 40 Mvar SVG 装置(风电场 B, 450 MW), SVG 装置均装设于 220 kV 升压站的 35 kV 侧, 且为 Y 型接线。

两座风电场升压站 SVG 无功控制策略一致, 见图 6。由图 6 可知, SVG 装置高低穿进入阈值以相电压有效值作为判据, 高穿进入阈值为 1.15 p.u., 低穿进入阈值为 0.85 p.u., 其无功控制策略如下:

1) 进入高穿的判断条件为各相电压均大于低穿阈值并且任意一相电压高于高穿阈值。

2)进入低穿的判断条件为各相电压均小于高穿阈值并且任意一相电压低于低穿阈值。

3)高穿或低穿期间，SVG 无功电流响应值与机端正序电压有关：

高穿期间

$$I_{qref} = I_{q0} + 5 \times (1.1 - V_{POS}) \times I_N \quad (1)$$

低穿期间

$$I_{qref} = I_{q0} + 1.5 \times (0.9 - V_{POS}) \times I_N \quad (2)$$

式(1)、(2)中： I_{qref} 为 SVG 高/低穿期间响应无功电流； I_{q0} 为故障前稳态无功电流； I_N 为额定电流； V_{POS} 为 SVG 机端正序电压。



图 6 锡盟风电集中送出系统 SVG 装置原有无功控制策略

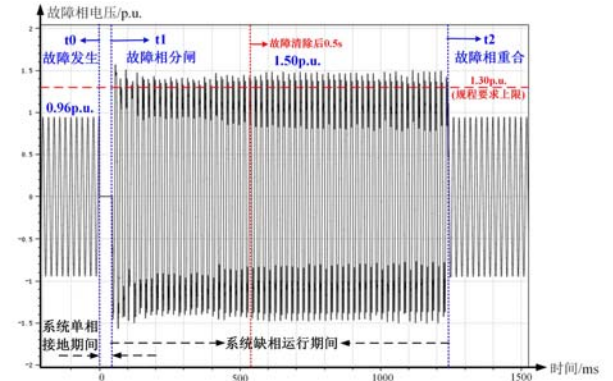
Fig. 6 Existing control strategy of reactive power for SVG in one new energy transmission project in Ximeng system

2.2 SVG 原有策略存在的缺陷

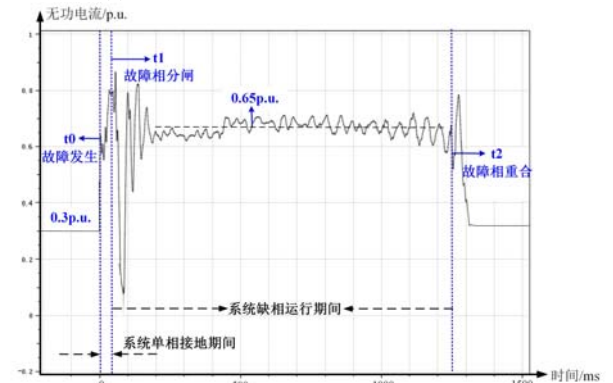
为满足新能源送出工程投产的需要，在工程投产前需对暂态过电压水平进行计算校核。根据相关规程要求^[21]，新能源场站及其新能源机组和 SVG 装置电磁暂态仿真模型均需通过单机至场站级的模型校验——即在构建相关设备实物控制器硬件在环测试平台基础上，仿真模型在低电压穿越、高电压穿越、稳态调节等不同工况下的动作逻辑及响应特性均已验证与实际情况严格保持一致，其响应情况与半实物测试数据误差满足标准要求。

计算时，两座新能源场站风机机组及 SVG 装置按全容量并网考虑，风电同时率设置为 90%，500 kV 汇集线路故障及动作时序为：0 s 时刻，500 kV 线路近汇集站侧发生单相(A 相)接地故障；40 ms 后，线路近故障侧故障相单相跳闸；1 200 ms 后，故障线路两侧故障相单相重合。

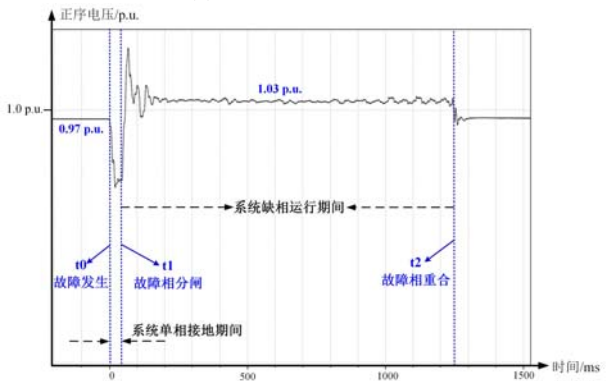
计算结果显示，故障发生及清除后至故障相重合的系统缺相运行期间，汇集站及新能源场站各电压等级母线故障相电压明显偏高，并且 SVG 装置在系统缺相运行期间存在仍增发无功的“反调”现象，见图 7，图 7 中 SVG 电流以其额定电流为基准，取容性无功电流方向为正方向。



(a) 汇集站 500kV 母线故障相电压变化



(b) SVG 无功电流变化



(c) SVG 机端正序电压变化

图 7 原有策略下 500 kV 汇集线路单瞬故障发生及清除后暂态过电压及 SVG 无功响应情况

Fig.7 Variation of transient overvoltage and reactive power of SVG during single phase earthing fault of gathering line under existing control strategy

1)由图 7(a)可见，汇集线路单瞬故障后，汇集站 500 kV 母线故障相电压最大值约为 1.58 p.u.，经过约 60~80 ms 衰减后，故障相电压维持在 1.48 左右。根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》要求^[22]，500 kV 系统线路断路器的变电站侧暂时过电压不宜超过 1.3 p.u.；考虑华北电网过电压保护动作定值要求，500 kV 系统保护定值设置为相对地电压超 1.3 p.u 后 0.5s 即跳闸。显然，故障相分闸后 0.5 s，汇集站 500 kV 母线故障相电压仍明显高于 1.3 p.u.，不满足规

程要求。

2)进一步,由图 7(b)可见,新能源场站 SVG 在系统缺相运行期间增发无功是导致或加剧暂态过电压的重要原因: t_0 时刻前(即单相接地故障发生前),SVG 稳态无功电流控制在约 0.3 p.u.; t_0 至 t_1 单相接地故障期间,SVG 增发无功; t_1 时刻后(即故障相分闸后)约 100 ms 至 200 ms,SVG 无功电流在 0.65 p.u. 左右小幅振荡; t_2 时刻故障相重合后,SVG 无功电流恢复至故障前 0.3 p.u.。

结合图 6、7, t_1 至 t_2 期间,SVG 增发无功的响应情况符合原有控制策略:

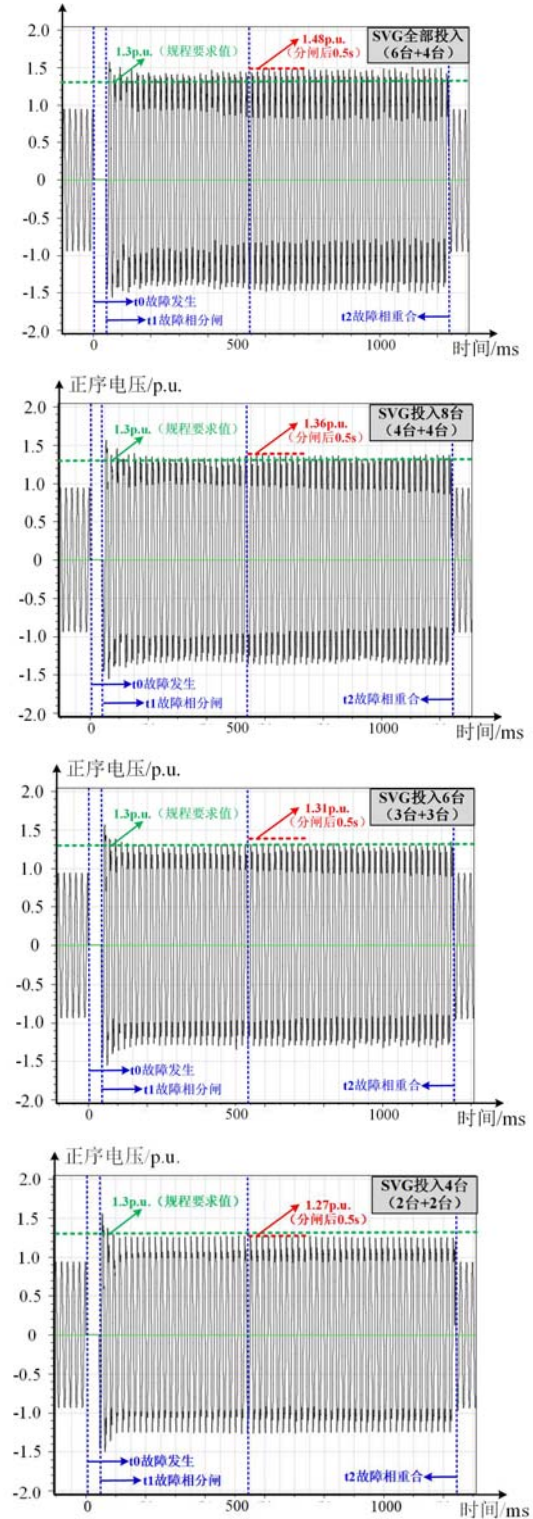
1)故障相分闸后,相电压在 1 至 3 个周波内升高最高约 1.58 p.u.并在缺相运行期间维持在 1.48 p.u. 以上,满足进入高穿模式的判据(即最高相电压大于 1.15 p.u.);

2)由图 7(c)可以看出缺相期间 SVG 机端正序电压约 1.03 p.u.,根据式(1),高穿期间 SVG 无功响应电流为

$$I_{qref} = I_{q0} + 5 \times (1.1 - 1.03) \times I_n \quad (3)$$

由式(3),计算得到:相比故障前稳态,系统缺相运行期间 SVG 将增发约 0.35 p.u.无功电流。结合式(3)计算结果及图 7(b)可见,该预估值与仿真结果基本相符。

经调研,图 6 所示无功控制策略应被应用于华北电网多个工程中的 SVG 装置中,导致工程存在无功“反调”进而引发暂态过电压超限的风险。为了进一步验证 SVG 在当前策略下的无功响应情况是导致或加剧系统缺相运行期间暂态过电压的重要原因,计算了上述两座新能源场站在不同 SVG 投退情况下暂态过电压情况,SVG 全部退出、部分投入、全部投入情况下的汇集站母线故障相电压变化见图 8。由图 8 可见,随着两座新能源场站 SVG 投入数量的减少,汇集线路故障发生及清除导致的暂态过电压呈变小趋势,尤其系统缺相运行稳态阶段故障相电压明显降低:在 SVG 全部投入情况下(6 台±63 Mvar, 4 台±40 Mvar),系统缺相运行稳态阶段故障相电压约 1.48 p.u.;当两站均只投入 3 台 SVG 装置时,缺相期间稳态电压降至约 1.31 p.u.;而当两站 SVG 全部退出时,缺相期间稳态电压降至约 1.17 p.u.,从而进一步验证了 SVG 在系统缺相期间增发无功是导致或加剧暂态过电压的重要原因。



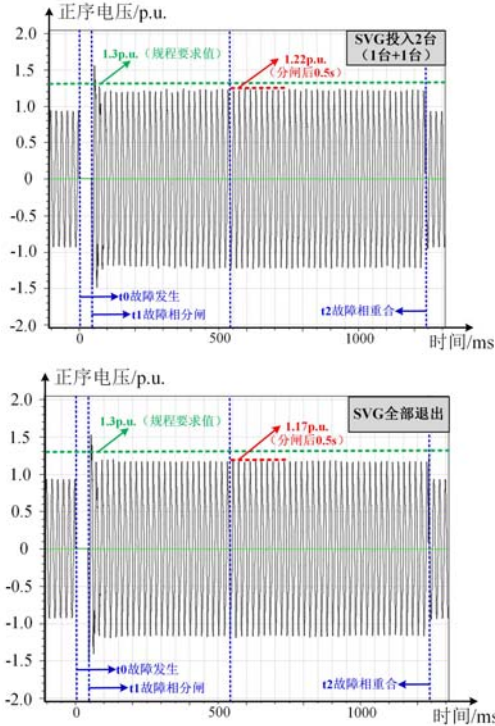


图8 不同SVG投入数量下汇集站500 kV母线故障相暂态过电压情况

Fig. 8 Transient overvoltage of 500 kV fault phase in system equipped with different amounts of SVGs

综合以上分析，本章节所述风电集中送出工程在500 kV汇集线路故障发生及清除至故障相重合期间，故障相电压超过原有规程要求，并且两座新能源场站SVG在当前控制策略下的无功“反调”响应情况是导致或加剧该暂态过电压的重要原因。考虑到单纯靠减少SVG投入数量以降低过电压可能引发系统电压波动过大等其他问题，因此有必要对SVG装置原有无功控制策略进行优化调整。

3 基于SVG缺相控制的暂态过电压抑制方法

3.1 缺相期间SVG无功控制策略调整思路

针对系统缺相运行期间SVG增发无功导致或加剧暂态过电压的问题，有必要控制系统缺相运行期间SVG无功出力。根据图8所示计算结果，在SVG投入数量为0的情况下，暂态过电压将显著降低至规程要求的1.3 p.u.以下。由于“退出全部SVG”或使“SVG在单瞬故障后直接闭锁”将威胁系统电压稳定性，不具备工程可行性，因此考虑在常规高压/低压故障穿越控制策略基础上，增加系统缺相期间SVG无功控制策略。

结合章节2.3分析结果，将系统缺相期间SVG无功电流控制在0(以发出无功为正)时，故障发生及清除

后暂态过电压能够满足原有规程要求。考虑裕度，优化控制策略下以 $-0.05I_n$ (即吸收0.05无功电流)作为系统缺相运行阶段的SVG无功电流控制值。优化控制策略后，各模式下SVG无功响应电流控制值见图9，图9中， I_n 为SVG额定电流，其余参量同图6。

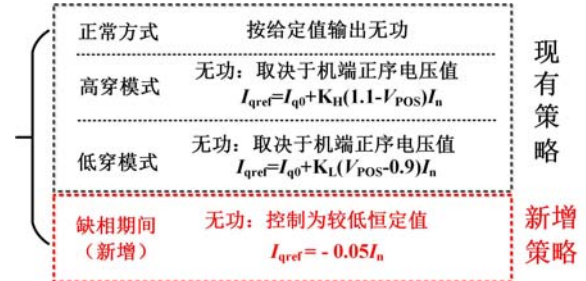


图9 SVG优化控制策略下各模式无功电流控制值

Fig. 9 Setting value of reactive current of SVG in different modes under adjusted control strategy

3.2 进入/退出缺相控制模式的判据

SVG如何识别系统已经进入/退出缺相运行状态进而执行上文所述响应情况，是策略优化调整的关键问题。首先，为避免出现SVG机端一相或两相电压较高而正序电压低于高穿阈值导致的无功增发问题，将判断进入高穿或低穿的特征参量与控制无功电流响应值的参变量统一为SVG机端正序电压。在此基础上，SVG进入/退出缺相控制模式判据的确定应满足以下原则：

原则一是缺相判据能够反映系统缺相运行的典型特征，系统进入或退出缺相运行状态时，SVG应能快速识别并正确进入或退出缺相控制模式。

原则二是缺相判据不应与原有故障穿越模式(高穿、低穿)判据存在重叠，以避免出现特定工况下SVG同时满足进入多种模式判据(缺相、高穿或低穿)引发执行混乱的问题。

1)为了满足原则一，利用系统在缺相运行期间存在的三相电压不平衡特征，以相电压或线电压有效值的最大值与最小值之差作为SVG进入/退出缺相模式的主要判据。考虑到锡盟新能源送出工程中SVG普遍采用三相三线角型接线方式，实际运行时能够实现对线电压的精确采集及监测，因此以SVG机端线电压有效值 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ac} 之间的差值作为SVG进入/退出缺相模式的判据。

500 kV汇集线路单瞬故障发生及清除后SVG机端线电压瞬时值的变化见图10，以SVG额定电压为基准(即1 p.u.=35 kV)，计算得到线电压有效值变化见表2。根据图10及表2可以看出：单相接地故障发生前(即 t_0 时刻前)及故障相成功重合后(即 t_2

时刻后)的稳态运行阶段, U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ac} 基本相等, 最大值与最小值之差 ΔU 小于 0.001 p.u.; 而在故障相分闸后至重合期间(t_1 至 t_2), 线电压最大值与最小值之差基本维持在 0.2 p.u. 以上。

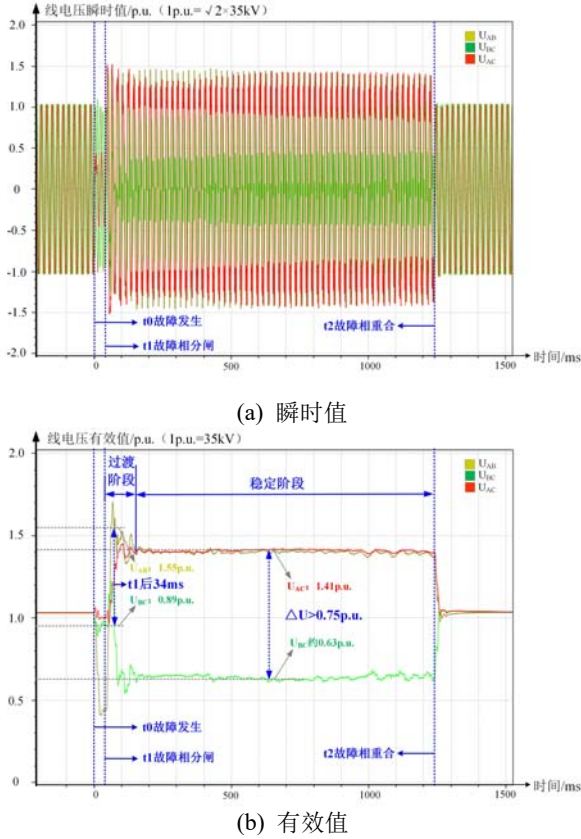


图 10 SVG 机端 35kV 线电压变化

Fig. 10 Variation of SVG terminal phase-to-phase voltages

表 2 单相接地故障前后各阶段 SVG 机端线电压有效值
Table 2 RMS value of phase-to-phase voltage in different stages after single phase earthing fault

阶段		电压/p.u.			
		U_{ab}	U_{bc}	U_{ac}	ΔU
t_0 前稳态运行		1.03	1.03	1.03	<0.01
t_1 故障分闸时刻		0.44	0.96	1.01	0.57
t_1 后缺相运行过渡阶段	t_1 后 15 ms	0.95	1.15	0.95	0.20
	t_1 后 25 ms	1.59	1.21	1.12	0.47
	t_1 后 35 ms	1.60	0.88	1.29	0.72
	t_1 后 50 ms	1.45	0.65	1.40	0.80
t_1 后缺相运行稳定阶段		1.40	0.63	1.41	0.78
t_2 故障相重合后稳态运行		1.03	1.03	1.03	<0.01

注: 1 p.u.=35 kV。

结合章节 1 中暂态过电压“两阶段”特征分析, 故障清除至重合期间, 由系统电压变化可分为缺相运行暂态阶段及稳态阶段: ①故障相清除 100 ms 内的缺相运行暂态阶段, 各线电压尚未稳定: 故障分闸后约 17 ms 时刻起, 线电压有效值最大值与最小值之差逐渐增大; 故障分闸后约 26 ms, 差值达

到 0.5 p.u.; 故障分闸后约 34 ms, 最大线电压 U_{ab} 已高于 1.55 p.u., 最小线电压 U_{bc} 已低于 0.90 p.u.; ②故障清除后约 100 ms, 进入缺相运行稳态阶段, 各线电压有效值 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ac} 分别稳定在 1.40、0.63、1.41 p.u. 左右, 各线电压有效值的最大值与最小值的差值基本维持在 0.78 p.u. 左右。进一步计算分析结果表明, 考虑新能源机组不同出力情况, 500 kV 汇集线路故障前后 SVG 机端线电压虽然在数值上与表 4 存在差异, 但各阶段线电压变化情况均符合上述特征。

因此, 基于缺相进入/退出判据确定的原则一, 结合上述缺相期间 SVG 机端线电压变化特征, 确定 SVG 进入/退出缺相控制模式的判断逻辑如下。

判断进入缺相模式逻辑: ①SVG 机端线电压有效值的最大值高于 $U_{进max}$; ②SVG 机端线电压有效值的最小值低于 $U_{进min}$ 。(注: 以上两个条件为“与”的关系, 即两个条件同时满足判断进入缺相控制模式)。

判断退出缺相模式逻辑: ①SVG 机端线电压有效值的最大值低于 $U_{退max}$ 并且最小值高于 $U_{退min}$; ②SVG 机端线电压的有效值的最大值与最小值的差值小于 $\Delta U_{退}$ 。(注: 以上两个条件为“或”的关系, 即两个条件满足其一即退出缺相控制模式)。

同时, 根据上述工程在故障前后不同阶段的线电压大小及最大值与最小值的差值, 初步确定 SVG 进入/退出缺相控制模式的相关判断阈值如下。

判断进入缺相模式相关阈值:

$$V_{进max} = 1.1 \text{ p.u.} \quad (4)$$

$$V_{进min} = 0.9 \text{ p.u.} \quad (5)$$

判断退出缺相模式相关阈值:

$$V_{退max} = 1.05 \text{ p.u.} \quad (6)$$

$$V_{退min} = 0.95 \text{ p.u.} \quad (7)$$

$$\Delta V_{退} = 0.05 \text{ p.u.} \quad (8)$$

2)为了满足原则二, 利用在系统缺相运行期间 SVG 机端正序电压较高特征, 进一步补充 SVG 机端正序电压最小阈值作为进入缺相模式判据, 从而与非对称短路故障期间 SVG 进入低穿的判据进行区分。理论上, 在线路发生非对称短路故障期间, SVG 机端也存在与缺相运行期间相似的三相电压不平衡现象, 从而可能导致在某一时刻 SVG 同时满

足进入低穿判据和进入缺相判据的情况。为避免不同模式判据重叠导致逻辑混乱，有必要对缺相模式与其他模式(尤其是非对称短路故障期间的低穿模式)的判据作进一步区分。

根据图 10 及表 2 结果，在 500 kV 汇集线路发生单瞬故障后，在 t_0 至 t_1 系统单相接地故障阶段和在 t_1 至 t_2 系统缺相运行阶段，SVG 机端三相电压不平衡特征均十分明显，两个阶段中 SVG 机端线电压最大值与最小值之差均在 0.5 p.u. 以上。然而，由图 7 中 SVG 机端正序电压变化情况可以看出，虽然单相接地期间与缺相期间 SVG 机端存在相似的三相电压不平衡现象，但正序电压变化呈现明显的差异性：单相接地故障期间，SVG 机端正序电压由故障前 0.97 p.u. 降至 0.80 p.u. 以下(故障相分闸 t_1 时刻约 0.75 p.u.)，而在故障相分闸 15 ms 后的缺相运行阶段，SVG 机端正序电压基本维持在 1.0 p.u. 以上。因此，在原则一基础上，进一步将“SVG 机端正序电压不低于 1.0 p.u.”作为 SVG 进入缺相判据之一。

3.3 基于缺相控制的 SVG 无功控制策略

新增缺相控制策略后，SVG 控制策略见图 11。在该控制策略下，仿真校验了 500 kV 汇集线路单瞬故障后至故障相重合期间 SVG 装置响应情况，结果见图 12。由图 12 可以看出：

1) 线路 A 相发生接地故障时刻 t_0 至故障相分闸时刻 t_1 期间，SVG 机端正序电压逐渐下降。 t_0 时刻后约 10 ms，SVG 机端正序电压由故障前 0.97 p.u. 降至 0.85 p.u. 以下，并在随后下降至最低约 0.70 p.u.，满足图 11 所示 SVG 进入低穿模式判据，SVG 增发无功电流(由故障前 0.3p.u. 增加至最高约 0.72p.u.)。

2) 故障相分闸 t_1 时刻起，SVG 机端正序电压逐渐升高，并且线电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ac} 之间的差异逐渐增大。至 t_1 时刻后约 10 ms，SVG 机端正序电压升至 0.9 p.u. 以上，满足退出低穿模式判据；而在 t_1 时刻后约 33 ms，SVG 机端正序电压约为 1.19 p.u.，并且线电压有效值最大值 U_{ac} 约 1.49 p.u.，线电压有效值最小值 U_{bc} 约 0.9 p.u.，满足图 11 所示 SVG 进入缺相模式判据，SVG 开始执行缺相模式响应，即无功电流以 -0.05 p.u. 为目标值开始逐渐下降。

3) 故障相分闸时刻 t_1 后约 70 ms，系统进入缺相运行稳态阶段，SVG 机端线电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ac} 分别维持在 1.20、0.5、0.89 p.u. 左右，该阶段虽然 SVG 机端正序电压为 0.84 p.u.，但由于不满足图 11 所示退出缺相模式判据，因此 SVG 响应无功电流仍稳定在缺相模式下的 -0.05 p.u.。

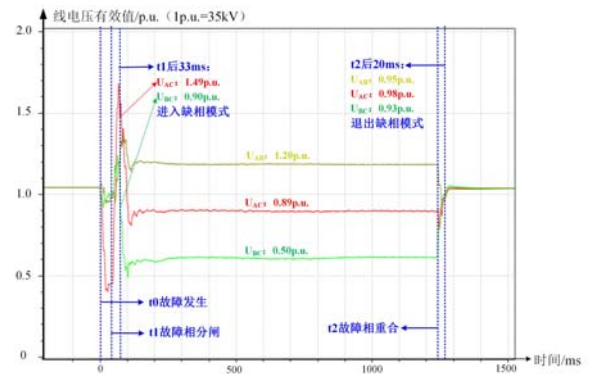
4) 故障相重合时刻 t_2 起，SVG 机端线电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ac} 之间的差异开始减小。至 t_2 时刻后约 20 ms，线电压最大值与最小值之差 ΔU 降至 0.05 p.u. 以下，

满足图 11 所示 SVG 退出缺相模式判据，SVG 机端正序电压及无功电流响应逐渐恢复至故障前水平。

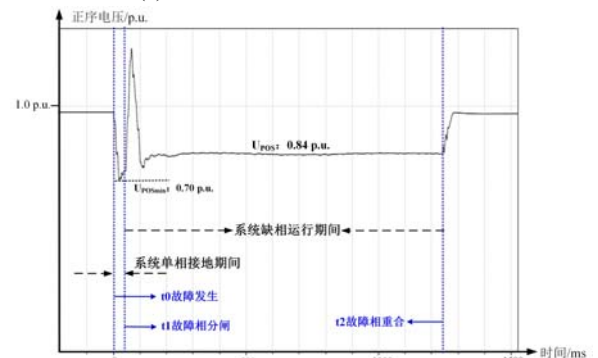
正常	判据: $0.9\text{p.u.} \leq \text{机端正序电压} \leq 1.1\text{p.u.}$ 无功响应: $I_{qref} = Q/V_{InRmsAvg}$	各参量含义同图8及图5: $V_{InRmsAvg}$ 为初始电压; I_{qref} 为响应无功电流; I_{q0} 为初始无功电流; I_n 为SVG额定电流; K_{H1} 为高穿无功控制系数,取5.0; K_L 为低穿无功控制系数,取1.5; V_{pos} 为机端正序电压。
高穿	进入判据: 机端正序电压高于1.15p.u. 退出判据: 机端正序电压低于1.10p.u. 无功响应: $I_{qref} = I_{q0} + K_{H1}(1.1 - V_{pos})I_n$	
低穿	进入判据: 机端正序电压低于0.85p.u. 退出判据: 机端正序电压高于0.90p.u. 无功响应: $I_{qref} = I_{q0} + K_L(V_{pos} - 0.9)I_n$	
缺相	进入判据: 同时满足 1) 机端线电压有效值最大值高于1.1p.u. 2) 机端线电压有效值最小值低于0.9p.u. 退出判据: 满足其一 1) 机端线电压有效值最大值低于1.05p.u.且最小值高于0.95p.u. 2) 机端线电压有效值最大值与最小值差值小于0.05p.u. 无功响应: $I_{qref} = -0.05I_n$ (以发无功为正)	

图 11 锡盟系统某新能源送出工程 SVG 装置优化调整后无功控制策略

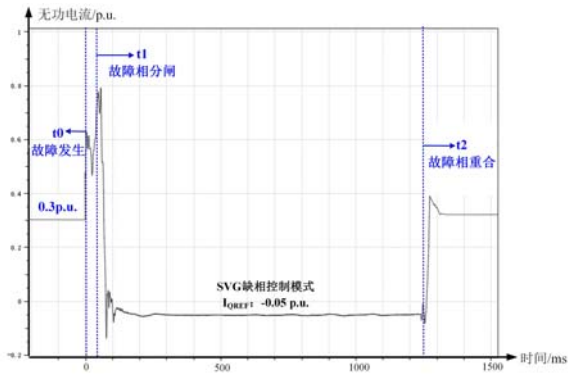
Fig. 11 Adjusting control strategy of reactive power for SVG in one new energy transmission project in Ximeng system



(a) SVG 机端线电压有效值变化



(b) SVG 机端正序电压变化



(c) SVG 无功电流变化

图 12 优化策略后 500kV 汇集线路单瞬故障发生及清除后 SVG 机端电压及无功响应情况

Fig.12 Variation of terminal voltage and reactive power of SVG during single phase earthing fault of gathering line under adjusted control strategy

根据上述分析,得到缺相控制策略下 SVG 各阶段响应模式见图 13。由图 13 可见,在新增缺相控制策略下,SVG 装置能够在系统单相接地故障发生及清除后迅速进入缺相控制模式,在系统缺相运行期间稳定执行缺相模式下的无功电流控制值,并在故障相重合后迅速退出缺相模式并恢复至故障前稳态。经进一步校验,新增缺相控制策略后,SVG 及新能源机组模型仍可以在对称、非对称或连续故障工况下稳定运行;低电压穿越、高电压穿越能力均满足规程要求。



图 13 优化策略后 500 kV 汇集线路单瞬故障发生及清除后 SVG 机端电压及无功响应情况

Fig. 13 Variation of terminal voltage and reactive power of SVG during single phase earthing fault of gathering line under adjusted control strategy

4 SVG 缺相控制策略有效性验证

为验证 SVG 缺相控制策略有效性,图 14 对比给出了 SVG 无功控制策略调整前后,500 kV 汇集线路单瞬故障后至故障相重合期间,汇集站 500 kV 母线故障相电压变化。SVG 无功控制策略调整前后各电压等级暂态过电压情况见表 3。由图 14 及表 3 可见,SVG 无功策略调整后,汇集站 500 kV 缺相运行稳定阶段的故障相电压由原有策略下的 1.48 p.u.降低至 1.03 p.u.,从而满足了 GB/T 50064—2014

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合涉及规范》中关于 500 kV 系统线路断路器变电站侧暂时过电压不宜超过 1.3 p.u.的要求,并且其他电压等级暂态过电压情况亦有明显降低。

根据上述分析,通过增加 SVG 缺相控制策略,能够显著降低汇集线路故障发生及清除后缺相运行稳定阶段的过电压大小,从而验证了以三相电压不平衡度为判据、以限制缺相期间响应电流为手段的暂时过电压抑制策略有效性。

因此,锡盟地区该风电汇集送出工程在落实 SVG 装置等设备控制策略优化措施后,满足了全容量并网和发电需求。目前,基于缺相控制的暂态过电压抑制策略已在华北电网锡盟别力古台、巴彦杭盖、锡林浩特等多座 500 kV 风电汇集站下接风场以及天津盐光互补光伏送出工程中应用,基本取代退掉新能源送出线路单相重合闸的临时措施,为新能源集中送出系统暂态过电压超限问题的治理提供了可行方案,提高了新能源场站对电力供应的稳定性。

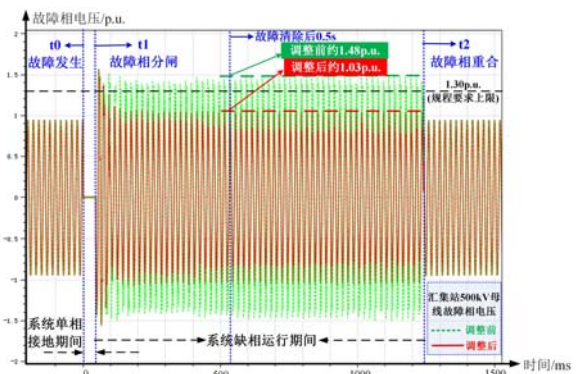


图 14 优化策略前后 500 kV 汇集线路单瞬故障发生及清除后暂态过电压情况对比

Fig. 14 Comparison between transient overvoltage during single phase earthing fault of gathering line under existed and adjusted control strategy

表 3 SVG 控制策略调整前后暂态过电压对比 /p.u.

Table 3 Comparison between transient overvoltage under existing and adjusted reactive power control strategy of SVG

电压等级 /kV	故障清除后至故障相重合期间暂态过电压/p.u.			
	策略调整前		策略调整后	
	最大峰值	稳定值	最大峰值	稳定值
500.0	1.58	1.48	1.55	1.03
35.0	1.39	1.32	1.35	1.12
0.8(正序)	1.29	1.13	1.25	0.93

5 结论

1) 新能源集中送出工程典型场景下,汇集线路发生单相瞬时接地故障后,在线路故障相分闸至重合期间,汇集站及新能源场站母线存在暂态过电压

现象, 并且该暂态过电压通常呈“两阶段”特征, 即分为缺相稳态阶段和缺相稳态阶段。各阶段暂态过电压取决于新能源机组和 SVG 装置无功响应特性, 其中缺相暂态阶段电压近似呈工频衰减, 缺相稳态阶段三相电压呈不平衡并至少一相电压偏高。

2) 现行标准未对不对称故障下新能源场站的高电压穿越要求做出规定, SVG 装置在原有无功控制策略下, 存在系统缺相运行期间增发无功的无功“反调”问题, 加剧了系统暂态过电压风险。

3) 提出了以三相电压不平衡度为判据、以限制系统缺相运行期间无功响应电流为手段的 SVG 控制策略优化方法。该优化策略能够在不影响已有正常、低穿及高穿控制模式的前提下, 使 SVG 正确判断和迅速响应以进入或退出缺相模式, 并通过将缺相模式下 SVG 无功电流响应值设定为一较低电流值, 能够显著降低系统缺相运行期间暂态过电压水平。

参考文献:

- [1] 周远翔, 陈健宁, 张 灵, 等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianing, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, Carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.
- [2] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double Carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [3] 韩民晓, 赵正奎, 郑竞宏, 等. 新能源场站电网暂态电压支撑技术发展动态[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1309-1322.
HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, ZHENG Jinghong, et al. Development of dynamic voltage support for power grid with large-scale renewable energy Generation[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1309-1322.
- [4] 于思奇, 孙大卫, 吴林林, 等. 新能源汇集系统短路故障清除后的暂态过电压机理[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 179-185.
YU Siqi, SUN Dawei, WU Linlin, et al. Transient overvoltage mechanism after short circuit fault removal of renewable energy collection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 179-185.
- [5] 李帛洋, 晁璞璞, 徐式蕴, 等. 风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题研究综述[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 26-35.
LI Boyang, CHAO Pupu, XU Shiyun, et al. Review on transient overvoltage issues of wind power transmission system via UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 26-35.
- [6] 李帛洋, 晁璞璞, 李卫星, 等. 风电经特高压直流送出系统的暂态过电压计算方法[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 11-18.
LI Boyang, CHAO Pupu, LI Weixing, et al. Transient overvoltage calculation method of wind power transmission system via UHVDC[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(12): 11-18.
- [7] 王 蒙, 张文朝, 汪 莹, 等. 高比例光伏接入的电力系统暂态过电压控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 148-155.
WANG Meng, ZHANG Wenchao, WANG Ying, et al. Transient overvoltage control strategy of power system considering high proportion photovoltaic access[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(10): 148-155.
- [8] 王熙纯, 刘 纯, 林伟芳, 等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4612-4621.
WANG Xichun, LIU Chun, LIN Weifang, et al. Influence of wind turbine fault ride-through characteristics on transient overvoltage of large-scale wind power DC transmission systems and parameter optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4612-4621.
- [9] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 124-129.
SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 124-129.
- [10] 刘昕宇, 史兴华, 辛焕海, 等. 故障恢复期间新能源多场站系统过电压快速评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(13): 168-175.
LIU Xinyu, SHI Xinghua, XIN Huanhai, et al. Fast assessment method for overvoltage in multiple renewable energy station system during fault recovery process[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 168-175.
- [11]李 湃, 王伟胜, 黄越辉, 等. 大规模新能源基地经特高压直流送出系统中长期运行方式优化方法[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 31-40.
- LI Pai, WANG Weisheng, HUANG Yuehui, et al. Method on optimization of medium and long term operation modes of large-scale renewable energy power base through UHVDC system[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 31-40.
- [12]张桂红, 王世斌, 田 旭, 等. 大规模新能源并网直流工程送端电网暂态过电压抑制策略研究[J]. 电力与能源进展, 2021, 9(5): 237-249.
- ZHANG Guihong, WANG Shibin, TIAN Xu, et al. Research on suppression strategies for transient overvoltage of export power network of large-scale new energy grid-connected DC project[J]. Advances in Energy and Power Engineering, 2021, 9(5): 237-249.
- [13]杜维柱, 罗亚洲, 李蕴红, 等. 风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3224-3239.
- DU Weizhu, LUO Yazhou, LI Yunhong, et al. Reviews of transient overvoltage problem cause by extra reactive power in large scale wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3224-3239.
- [14]徐晓宾, 李凤婷. 不对称故障下直驱永磁风电机组运行控制方式综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(1): 96-102.
- XU Xiaobin, LI Fengting. Review on operation control mode for direct drive permanent magnet wind turbine under asymmetrical fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1): 96-102.
- [15]吴林林, 王 潇, 杨艳晨, 等. 新能源汇集系统单瞬故障清除后的非全相运行过程工频过电压[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4362-4371.
- WU Linlin, WANG Xiao, YANG Yanchen, et al. Power frequency overvoltage during open-phase operation process after clearance of single-phase transient earth fault in a new energy gathering system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4362-4371.
- [16]王晨星, 王 聪, 彭 珑, 等. 基于避雷器 TOV 特性扩展华北风电集送系统工频过电压限值的研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 33-42.
- WANG Chenxing, WANG Cong, PENG Long, et al. Extension of limit value of power-frequency overvoltage based on TOV withstand characteristics of arresters in north China centralized wind power transmission system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 33-42.
- [17]吕清洁, 徐 政, 李 晖, 等. 动态无功补偿对风电场暂态电压的影响及控制策略[J]. 电力建设, 2015(8): 122-129.
- LV Qingjie, XU Zheng, LI Hui, et al. Effects of dynamic reactive power compensation on wind farm transient voltage and its control strategy research[J]. Electric Power Construction, 2015(8): 122-129.
- [18]杨大业, 项祖涛, 罗煦之, 等. 永磁型风机海上风电送出系统甩负荷故障暂时过电压影响因素分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 111-118.
- YANG Daye, XIANG Zutao, LUO Xuzhi, et al. Analysis on influence factors of temporary overvoltage of load rejection fault of offshore wind power transmission system of permanent magnet synchronous generator[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 111-118.
- [19]谢 欢, 吴 涛, 赵亚清, 等. 计及动态无功控制影响的风电汇集地区高电压脱网原因分析[J]. 电力系统自动化, 2015(4): 19-25.
- XIE Huan, WU Tao, ZHAO Yaqing, et al. Analysis on high-voltage trip-off causation of dense wind power areas considering impact of dynamic reactive power control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(4): 19-25.
- [20]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.
- Technical specification for connecting wind farm to power system - Part 1: On shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [21]风电场动态无功补偿装置并网性能测试规范: NB/T 10316—2019[S].北京: 中国计划出版社, 2019.
- Test specification for grid connection behaviour of dynamic reactive power compensation device in wind farm: NB/T 10316—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [22]交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Code for design of overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: GB/T 50064—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- 王晨星(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统过电压仿真分析(E-mail: 879929174@qq.com).