

兼顾电网频率和功角稳定性的柯拉光伏电站 低电压穿越关键性能指标优化

汤凡, 李鑫, 刘佳钰, 梁晓斌

(国家电网有限公司西南分部, 四川 成都 610041)

摘要:雅砻江柯拉光伏电站是西南电网首座百万千瓦级光伏电站,与木绒水电站构成大容量水光互补系统,其低电压穿越特性对电网频率、功角稳定性均存在一定影响。首先,研究了光伏电站低电压穿越影响电网频率稳定的机理、水光互补系统功角稳定特性,提出了一种量化评估光伏电站低电压穿越影响电网频率的工程实用方法;然后,分析了柯拉光伏电站低电压穿越关键性能指标对西南电网频率、功角稳定性及对负荷中心暂态电压稳定的影响;最后,提出一种兼顾电网频率和功角稳定性的光伏电站低电压穿越关键性能指标优化方法,并通过对柯拉光伏的仿真测试验证了所提方法的有效性。

关键词:水光互补系统; 低电压穿越; 频率稳定; 功角稳定; 参数优化

中图分类号: TM 721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)02-0011-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240203

Optimization of Key Performance Indicators for LVRT of Kela PV Station Considering Grid Frequency and Power Angle Stability

TANG Fan, LI Xin, LIU Jiayu, LIANG Xiaobin

(Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Kela PV station is the biggest photovoltaic power station in the southwest power grid, which forms a large-capacity hydro-photovoltaic complementary system with Murong hydropower station. Its low voltage ride-through (LVRT) characteristics have an impact on frequency and power angle stability of power grid. Firstly, the mechanism of LVRT of PV station affecting frequency stability of power grid is studied, as well as the power angle stability characteristics of hydro-photovoltaic complementary system. An engineering practical method for quantitatively evaluating the impact of LVRT of PV station on grid frequency is proposed. Then, the impacts of key performance indicators for LVRT of Kela PV station on frequency, power angle stability and transient voltage stability of southwest power grid are analyzed. Finally, an optimization scheme for key performance indicators for LVRT of PV station that takes into account the frequency and power angle stability of power grid is proposed, and the effectiveness of the proposed scheme is verified through simulation testing of Kela PV station.

Key words: hydro-photovoltaic complementary system; low voltage ride-through; frequency stability; power angle stability; parameter optimization

0 引言

随着光伏装机容量和渗透率不断提高,光伏发电机组的接入对电网稳定特性的影响持续加大,尤其是光伏电站的低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT,下面简称低穿)对电网稳定运行的影响愈发突出^[1-2]。

随着雅砻江、金沙江等流域水光互补基地建设提速,大容量光伏电站经远距离水电通道接入主网,其低穿特性对西南电网安全运行的影响愈发凸显。光伏低穿期间,受逆变器荷载限制,光伏电站有功出力大幅受限,当系统电压恢复后其有功功率按给定速率缓慢恢复。与常规的跳机等故障造成阶跃性有功功率缺额不同,光伏电站低穿造成的有功功率缺口具有暂时性、非阶跃和可恢复的特征,并且光伏电

站低穿引发的功率缺额与装机分布、系统强度、故障地点、故障类型、运行方式等密切相关,因此水光互补系统中,光伏电站低穿对电网频率和电源送出系统功角稳定等造成的影响将更难防控。现有研究^[3-12]大多面向光伏电站低穿引起的频率、功角或电压单一稳定问题,少有文献针对大容量水光互补系统可能面临的多种稳定问题叠加的情况开展系统研究。水光互补系统建设运行中,如何兼顾电网频率、功角等约束确定水光互补系统控制性能指标等缺乏相关方法指导。

下面研究了光伏电站低穿影响电网频率稳定的机理和水光互补系统功角稳定特性,提出了一种量化评估光伏电站低穿影响电网频率的工程实用方法;然后,在此基础上结合柯拉—木绒水光互补系统,仿真分析了柯拉光伏电站低穿关键性能指标对西南电网频率、功角稳定性及对负荷中心暂态电压稳定的影响;最后,提出一种兼顾电网频率和功角稳定性的光伏电站低穿关键性能指标优化方法,并通过柯拉光伏电站的仿真测试验证了该方法的有效性。

1 光伏电站低穿对电网频率的影响

1.1 光伏电站低穿期间有功功率外特性

光伏电站低穿期间典型的电压及有功功率曲线如图 1 所示。图中: P_N 、 P_0 、 P_{LVRT} 分别为光伏电站额定有功功率、初始有功功率和低穿期间有功功率; U_0 、 U_1 、 U_2 分别为光伏电站初始电压、进入/退出低穿时电压、故障清除时刻电压; t_1 、 t_c 、 t_2 、 t_3 分别为故障发生、故障清除、功率开始恢复和功率恢复至初值时刻。

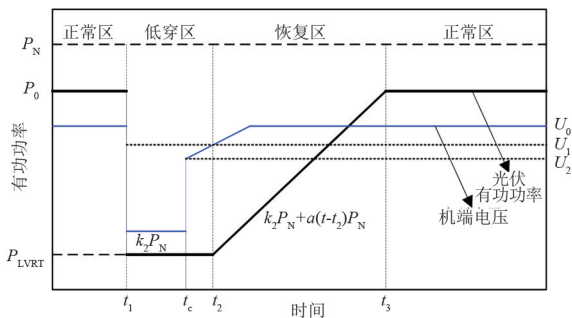


图 1 光伏低穿期间典型电压、有功功率曲线

由图 1 可见,光伏电站低穿过程按时序可分为

正常区、低穿区、恢复区、正常区 4 个阶段。当光伏电站机端电压低于低穿进入/退出电压门槛 U_1 时,光伏电站有功功率迅速降至较低值 P_{LVRT} ;当故障清除且新能源机端电压恢复至大于 U_1 时,光伏电站有功功率按照一定速率逐步恢复至初始值。受故障影响进入低穿的光伏电站有功功率外特性可用式(1)描述。

$$P(t) = \begin{cases} k_1 P_N & 0 < t \leq t_1 \\ k_2 P_N & t_1 < t \leq t_2 \\ k_2 P_N + a(t - t_2) P_N & t_2 < t \leq t_3 \\ k_1 P_N & t > t_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_1 为光伏电站的初始负载率, $k_1 = P_0/P_N$; k_2 为光伏电站低穿期间的有功系数, $k_2 = P_{LVRT}/P_N$; a 为光伏电站低穿恢复期间的有功功率恢复速率,根据图 1 可知, $a = (k_1 - k_2)/(t_3 - t_2)$ 。

1.2 光伏电站低穿影响电网频率的工程量化评估方法

为简化分析,忽略故障后负荷随频率和电压的变化,结合图 1 所示光伏电站低穿期间有功功率响应,含光伏发电机组的电网频率响应可由式(2)分段函数表示。

$$\begin{cases} \Delta\omega_{i2} = \frac{1}{M_{eq}} \int_{t_1}^{t_2} (\Delta P_m - \Delta P_L + \Delta P_{PV1}) dt \\ \Delta\omega_{i3} = \Delta\omega_{i2} + \frac{1}{M_{eq}} \int_{t_2}^{t_3} (\Delta P_m - \Delta P_L + \Delta P_{PV2}) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中: M_{eq} 为系统等值惯性常数; ΔP_m 为系统中常规发电机的机械功率变化量; ΔP_L 为故障期间的负荷变化量; $\Delta\omega_{i2}$ 、 $\Delta\omega_{i3}$ 分别为光伏电站低穿恢复开始、低穿恢复结束时刻的电网频率; ΔP_{PV1} 、 ΔP_{PV2} 分别为 $t_1 - t_2$ 、 $t_2 - t_3$ 区间内的光伏电站功率变化量。

$$\begin{cases} \Delta P_{PV1} = k_1 P_N - k_2 P_N \\ \Delta P_{PV2} = k_1 P_N - k_2 P_N - a(t - t_2) P_N \end{cases} \quad (3)$$

结合式(2)和式(3),可推导出光伏低穿结束时刻的电网频率为

$$\Delta\omega_{i3} = \frac{\int_{t_1}^{t_3} (\Delta P_m - \Delta P_L) dt + \left[k(t_2 - t_1) + \frac{k^2}{2a} \right] P_N}{M_{eq}} \quad (4)$$

式中, $k = k_1 - k_2$ 。一般光伏电站低穿持续时间为 1~3 s,为简化分析,忽略光伏电站低穿期间的常规

机组机械功率变化和供电负荷变化,则有

$$\Delta\omega_{t3} = \frac{P_N}{M_{eq}} \left[k(t_2 - t_1) + \frac{k^2}{2a} \right] \quad (5)$$

某些情况下,考虑线路重合闸作用,输电线路单相永久故障可能激发光伏电站连续2次进入低穿,此时系统频率变化可近似描述为

$$\Delta\omega \approx \frac{2P_N}{M_{eq}} \left[k(t_2 - t_1) + \frac{k^2}{2a} \right] \quad (6)$$

由式(5)可见,光伏电站低穿对电网频率的影响主要与以下因素有关:1)故障后进入低穿的光伏电站容量 P_N 。 P_N 越大对频率的影响越大。2)低穿区光伏电站有功系数 k_2 和光伏电站初始负载率 k_1 。低穿区有功系数 k_2 越小或初始负载率 k_1 越高则 k 越大,电网频率变化就越大。3)低穿恢复区有功恢复速率 a 。 a 越小电网频率变化越大。4)光伏电站电压支撑能力。电压支撑能力越弱则 t_2-t_1 值越大,频率变化就越大。

假定故障引发进入低穿的光伏机组容量占电网总发电功率的4%,不考虑线路重合闸且故障切除后光伏电站电压可恢复至低穿恢复电压门槛以上, $t_2-t_1=0.1$ s,电网等值惯性时间常数为9.86 s,不同光伏电站低穿区有功系数和恢复速率下的电网频率变化如图2所示。可见,当光伏电站有功功率恢复速率越小时,频率变化对低穿区有功系数越敏感;当低穿区有功系数越小,频率变化对有功功率恢复速率越敏感。对应某一低穿区有功系数,随着有功功率恢复速率增大,电网频率变化量将趋于饱和,继续增大有功功率恢复速率将无法显著降低频率变化量。

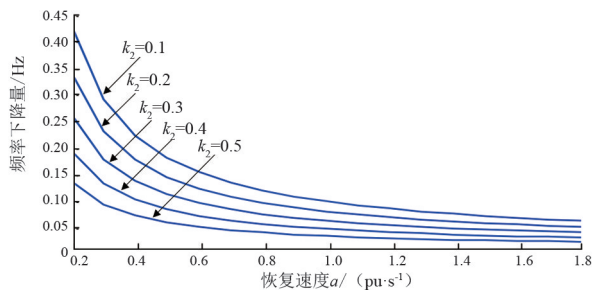


图2 光伏电站低穿参数对电网频率的影响

2 水光互补系统功角稳定特性

考虑光伏电站直接接入水电站高压侧母线,建

立水光互补系统等效电路如图3所示。图中: E' 为水电机组内电势; $x_G = x_d' + x_T$, x_d' 为水电机组暂态电抗, x_T 为变压器电抗; x_E 为送出线路电抗; E_B 为无穷大母线电压; E_l 为水电站高压侧母线电压; I_{PV} 为光伏电站注入电流;以 E' 为参考向量, δ 、 β 分别为 E_B 、 E_l 滞后 E' 的角度。

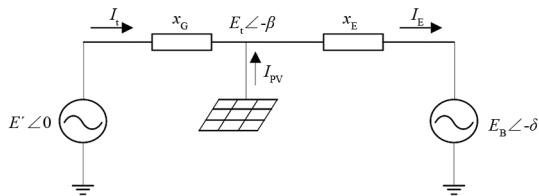


图3 水光互补系统等效电路

根据图3可知,有

$$\begin{cases} I_l = \frac{E' - E_l(\cos \beta - j \sin \beta)}{j x_G} \\ I_E = \frac{E_l(\cos \beta - j \sin \beta) - E_B(\cos \delta - j \sin \delta)}{j x_E} \\ I_E = I_l + I_{PV} \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7),考虑 $I_{PV} = I_p + j I_q$,其中 I_p 、 I_q 分别为光伏机组注入电流的有功、无功电流分量,可推导出水电机组的电磁功率为

$$P = \text{Re}(\tilde{E}' \tilde{I}_l^*) = \frac{E' E_B \sin \delta - I_p x_E E'}{x_G + x_E} \quad (8)$$

可见,光伏机组接入后的水电机组功角特性将随光伏机组注入有功电流增加而向右下方向移动,造成静稳极限下降。水光互补系统与无穷大系统间的电气距离越远, x_E 越大,则光伏机组对系统功角稳定性的影响越大。光伏机组接入后,在保持水光互补系统外送功率一致的情况下,通过增加水电开机容量减少 x_G ,有利于缓解光伏并网带来的影响。

典型的光伏逆变器有功控制框图如图4所示,有开环控制和闭环PI控制两种模式,一般采取有功

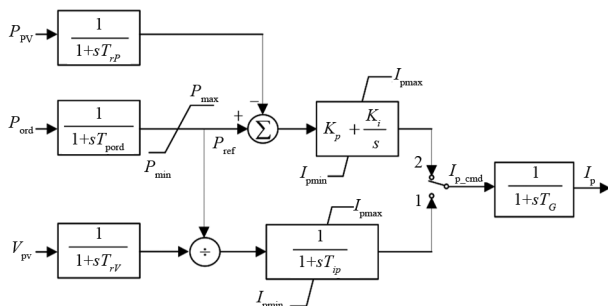


图4 光伏逆变器有功控制

功率和有功电流的闭环控制。忽略逆变器调节的过渡过程,并考虑光伏电站电压能够在故障清除后快速恢复至低穿恢复电压以上,则光伏有功功率和有功电流具有基本相同的变化趋势。

假设在水电站高压侧母线发生金属性接地故障,故障期间 $E_1 = 0$, 易知故障期间水电机组和光伏机组有功出力近似为 0。保持故障前水电机组出力相同,则光伏机组接入前后系统加速面积基本不变。下面重点分析光伏电站低穿过程对减速面积的影响。

考虑故障导致水光互补系统送出线路部分跳闸, x_E 在故障后增至故障前的两倍,故障后光伏电站功率按一定速率缓慢恢复。根据式(8)绘制水电机组功角特性如图 5 所示。图中, P1 为稳态情况下的功角特性; P3 为考虑故障清除后光伏电站瞬间恢复初始有功功率(不考虑低穿过程)对应的功角特性; P2 为考虑故障后光伏电站低穿、功率缓慢恢复对应的功角特性。可见,故障后光伏电站功率瞬间恢复对应的减速面积为 A_1 , 考虑光伏电站低穿后, 减速面积将增加 ΔA 。降低光伏电站低穿区有功功率或光伏电站有功功率恢复速率,将有助于增加减速面积,提高系统暂态稳定性。

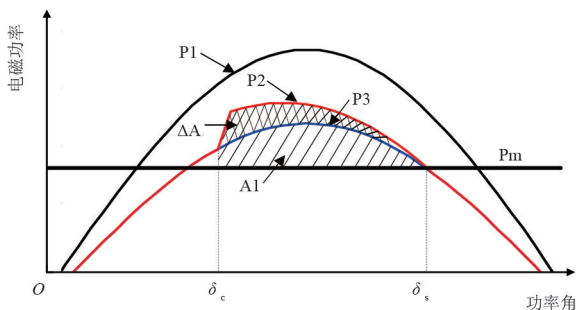


图 5 考虑光伏低穿的水电功角特性

3 柯拉光伏电站接入对西南电网的影响

3.1 柯拉光伏电站基本情况

柯拉光伏电站是雅砻江两河口(木绒)水电站水光互补一期项目,光伏装机规模为 1000 MW。柯拉—木绒水光互补系统是当前全球在运最大的水光互补项目。柯拉光伏电站经庆达、解放两座 220 kV 汇集站接入 500 kV 理塘变电站,再经过单回 50 km 的 500 kV 线路接入木绒水电站,木绒水电站再经过 XDQ-GGD-JC-YA-SZ 远距离级联通道送电至成都负荷中心,级联通道送电距离约 400 km。此外,在

XDQ 站还有装机 1000 MW 的红星光伏电站并网。柯拉光伏电站及其送出系统如图 6 所示。

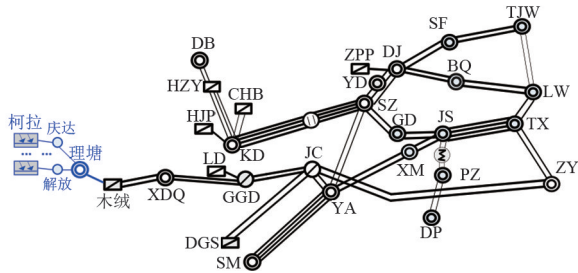


图 6 柯拉光伏电站及其送出系统

3.2 对水电通道功角稳定和负荷中心暂态电压稳定的影响

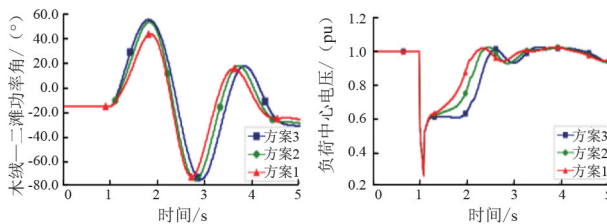
以 2023 年西南电网丰大运行方式为例,通过 PSASP 机电暂态仿真,研究柯拉光伏电站对柯拉—木绒水光互补系统功角稳定及成都电网暂态电压稳定的影响。重点对比分析了柯拉光伏电站不同的低穿特性对电网稳定性的影响。

仿真中,柯拉光伏电站低穿期间的有功系数、有功功率恢复速率如表 1 所示。柯拉光伏电站出力 1000 MW,木绒电厂出力 1000 MW,GGD-JC 断面外送 2300 MW。考虑 1 s 时成都地区 GD-SZ 双回线发生三相故障,1.1 s 故障线路跳闸,相关仿真结果如图 7 所示。

表 1 柯拉光伏电站低穿有功系数及有功功率恢复速率

方案	低穿有功系数/(pu)	有功功率恢复速率/(pu · s ⁻¹)
方案 1	0.1	1.0
方案 2	0.4	1.2
方案 3	0.7	1.4

可见,柯拉光伏电站低穿期间有功系数和有功功率恢复速率越小,柯拉—木绒水光互补系统功角稳定性越好。并且,柯拉光伏电站低穿期间的有功功率越小,也更有助于缓解水电通道的加速功率对负荷中心电压的影响,GD-SZ 双回线故障后的成都地区电压跌落深度和恢复时间越短。



(a) 木绒—二滩功角曲线

(b) 负荷中心电压曲线

图 7 柯拉光伏电站低穿对功角和电压的影响

3.3 对电网频率稳定的影响

以2023年西南电网枯小运行方式为例,研究柯拉光伏电站不同的低穿特性对电网频率稳定的影响。仿真中考虑西南电网总发电电力为44.5 GW,负荷为39.3 GW,常规机组开机容量为39 GW,柯拉光伏电站出力为1000 MW,电网旋转备用为2400 MW。柯拉光伏电站发电电力约占全网发电电力的2.25%。柯拉光伏电站低穿期间的有功系数、有功功率恢复速率同表1。考虑1 s时木绒电厂双回送出线中一回发生单相永久故障,2 s时线路重合闸失败跳三相,不考虑直流FC调节作用,相关仿真结果如图8所示。

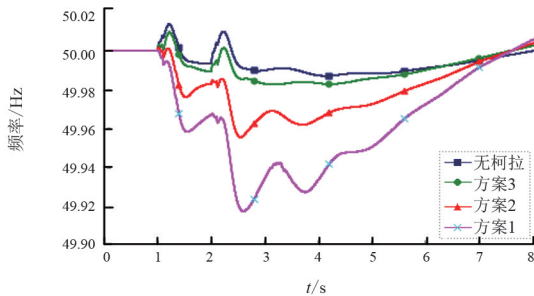


图8 柯拉光伏电站低穿对频率的影响

可见,柯拉光伏电站低穿将造成电网频率暂态跌落,方案1、方案2、方案3频率跌落幅值分别为0.08 Hz、0.04 Hz、0.02 Hz。而无柯拉光伏电站时,频率跌落幅值仅0.01 Hz。若再考虑通道内红星光伏电站的低穿,近区电网故障后光伏电站低穿对电网频率的影响将进一步增加。

同时,在忽略常规机组调节作用、功角波动和电网电压变化等因素后,基于式(6)的理论估算频率变化量分别为0.110 Hz、0.048 Hz、0.014 Hz,上述仿真结论与理论估算结果较为接近。

4 柯拉光伏电站低穿关键性能指标优化

4.1 优化方法

由上述分析可知,水光互补系统中,面向频率稳定与功角稳定的光伏电站低穿参数优化目标存在矛盾。从提升频率稳定性的角度,需要光伏电站低穿期间的暂态功率缺额小;而从提升功角稳定性的角度,又需要光伏电站低穿期间的暂态功率缺额大。针对该问题,提出一种兼顾电网频率和功角稳定的水光互补系统中光伏电站低穿参数优化方法。其主要思路为结合所述的量化评估光伏电站低穿影响电

网频率的工程实用方法,基于电网频率稳定性确定可行参数集合,再基于水光互补送出系统的暂态稳定性确定最优参数子集。具体步骤包括:

1)根据典型方式仿真,确定近区电网故障可能造成的光伏电站低穿范围,包括柯拉光伏电站及近区其他光伏电站;

2)基于式(6),结合电网小开机方式以及其他可能进入低穿的光伏电站参数,按照柯拉光伏电站低穿引起的频率变化量不超 $\Delta\omega_{\max}$,确定其低穿有功系数和有功功率恢复速率下限参数集合;

3)基于水电大发、光伏全停方式,确定柯拉—木绒水光互补系统送出通道稳定极限;

4)在光伏大发方式,保持水光互补系统送出功率为步骤3所确定的功率极限,不考虑水电旋转备用,校核不同光伏电站低穿有功功率系数和有功功率恢复速率对应的极限故障切除时间和成都电网暂态低电压持续时间;

5)选取极限故障切除时间和成都电网暂态低电压持续时间短的参数组合为推荐参数。

4.2 仿真测试

根据2023年典型方式仿真,在柯拉—木绒送出系统近区故障时,柯拉光伏电站及近区红星光伏电站均将进入低电压穿越。考虑西南电网枯水期最小发电出力为43 GW,电网等效惯性时间常数为9.86 s,柯拉光伏电站及红星光伏电站同时率为0.85。取 $\Delta\omega_{\max} = 0.07$ Hz,这代表了最不利工况下光伏电站低穿所引起的电网频率变化不造成西南电网直流FC动作^[13]。按照式(6)可得出受频率变化量约束的柯拉光伏电站低穿有功系数和有功功率恢复速率下限,见表2。

表2 受频率约束的有功系数及有功功率恢复速率下限

参数组合	低穿有功系数/(pu)	有功功率恢复速率/(pu·s ⁻¹)
组合1	0.4	1.57
组合2	0.5	1.00
组合3	0.6	0.60
组合4	0.7	0.31

从图6可知,柯拉光伏电站、木绒水电站及LD电厂均通过GGD-JC双回送出,基于通道内水电大发、光伏全停方式,确定受GGD-JC单回线路故障暂稳水平约束的GGD-JC双回稳定极限为2600 MW。保持GGD-JC双回线功率为2600 MW,在柯拉光伏电站1000 MW满功率运行方式下,校核表2参数下

对应的 GGD-JC 单回线路极限切除时间、GD-SZ 双回线路故障下成都电网暂态低电压持续时间,见表 3。其中成都电网暂态低电压持续时间取故障发生时刻至电压恢复至 0.85 pu 以上的时间。

表 3 备选参数组合的暂稳特性对比

参数组合	GGD-JC 线路 N-1 故障 极限切除时间/ms	GD-SZ 双回 N-2 故障成都 暂态低电压持续时间/ms
组合 1	115	1370
组合 2	104	1440
组合 3	100	1570
组合 4	94	1920

可见,随着柯拉光伏电站低穿期间有功系数减小,极限切除时间增加,成都电网电压恢复时间减小。在柯拉光伏电站退出运行、木绒水电站等量替代柯拉光伏电站 1000 MW 功率时,GD-SZ 双回 N-2 故障后成都暂态低电压持续时间为 1390 ms,基本与柯拉光伏电站在运时的参数组合 1、组合 2 结果一致,如图 9 所示。综合考虑上述校核结论,可以选取参数组合 1 或组合 2 为柯拉光伏电站推荐低穿性能指标。

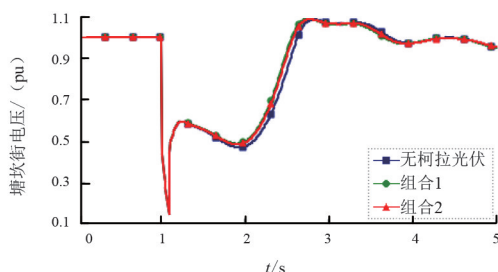


图 9 柯拉光伏电站优化参数后对成都电网电压的影响

5 结 论

1) 大容量水光互补系统中,光伏电站低穿特性对电网频率稳定和水光互补系统功角稳定均有影响,需要综合考虑上述两方面因素协调光伏电站低穿性能指标。

2) 针对面向频率稳定和功角稳定的光伏电站低穿参数优化目标存在矛盾的问题,提出基于频率稳定性确定可行参数集合,基于暂态稳定性确定最优参数子集的优化方法,针对柯拉光伏电站的仿真测试验证了上述方法的有效性。

参考文献

[1] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈

研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):20-26.

[2] 张剑云,李明节.新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3498-3506.

[3] 王士元,郑超,刘涛,等.计及 LVRT 的光伏高渗透电网动态频率特性及优化措施[J].电网技术,2020,44(6):2151-2159.

[4] 郑超,李媛,吕盼,等.规模化光伏并网对暂态稳定影响及应对措施[J].高电压技术,2017,43(10):3403-3411.

[5] 亢朋朋,毕立松,孙谊嫔,等.基于能量函数法的光伏和火电联合外送多机系统暂态稳定性分析[J].可再生能源,2022,40(4):543-549.

[6] 王岩,魏林君,高峰,等.光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):70-78.

[7] 屠竞哲,易俊,王超,等.考虑光伏动态特性的功角电压交互失稳机理分析[J].电力系统自动化,2020,44(13):157-165.

[8] 余墨多,黄文焘,邵能灵,等.基于光伏电站暂态特性的自适应暂稳控制方法[J].电工技术学报,2020,35(S2):512-522.

[9] 陈韦韬,吴翔宇,许寅,等.面向暂态功角稳定提升的水光互补发电系统紧急切机控制[J].电网技术,2023,47(2):658-668.

[10] 吕思昕,陈得治,申旭辉,等.风光涉网性能对宁夏电网第三道防线的影响[J].电测与仪表,2016,53(18):63-68.

[11] 许寅,王佳璇,吴翔宇,等.水光互补发电系统超低频振荡抑制控制策略研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2021,54(12):1248-1257.

[12] 曹斌,刘文焯,原帅,等.基于低电压穿越试验的光伏发电系统建模研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(18):146-155.

[13] 刘柏私,汤凡,余锐,等.高比例水电多直流送端电网频率稳定协调控制技术及实践[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):181-187.

作者简介:

汤 凡(1984),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统计算分析与稳定控制研究;

李 鑫(1990),男,硕士,工程师,主要从事电力系统计算分析与稳定控制技术研究;

刘佳钰(1993),女,硕士,工程师,主要从事电力系统稳定控制研究;

梁晓斌(1985),男,博士,高级工程师,主要从事电力系统稳定控制研究。

(收稿日期:2023-08-07)