

含大规模光储系统的电网暂态稳定特性分析

梁晓斌, 刘佳钰, 李鑫, 汤凡, 张宇栋

(国家电网有限公司西南分部, 四川成都 610041)

摘要:大规模光伏和储能接入电网使电网的暂态特性复杂化、暂态稳定问题多样化。为了明确大规模光伏和储能对电网暂态稳定性的影响,在仿真软件中搭建了含大规模光储系统的某地区电网仿真模型,分析了不同系统结构参数和变流器控制参数对含大规模光储系统的电网暂态稳定特性的影响;对于系统结构参数,研究光伏渗透率和储能光伏容量比对系统暂态稳定性的影响;对于变流器控制参数,分析光伏低电压穿越控制参数对系统暂态稳定性影响。并基于此研究了提升系统暂态稳定性的控制参数调整措施,可为光伏储能并网规划和运行提供实证参考。

关键词:光储系统; 光伏渗透率; 储能光伏容量比; 低电压穿越; 暂态稳定性

中图分类号:TM 712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)04-0053-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240408

Analysis on Transient Stability Characteristics of Power Grid with Large-scale Photovoltaic Energy Storage Systems

LIANG Xiaobin, LIU Jiayu, LI Xin, TANG Fan, ZAHNG Yudong

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

Abstract:The integration of large-scale photovoltaic (PV) and energy storage into power grid has introduced complexity to the transient characteristics of the grid, resulting in diverse transient stability issues. In order to understand the impact of large-scale PV and energy storage on transient stability of power grid, a simulation model of a regional power grid with a large-scale PV and energy storage system is constructed using simulation software, and the effects of different system structural parameters and inverter control parameters on transient stability characteristics of power grid with large-scale PV and energy storage system are analyzed. Firstly, the influence of PV penetration rate and PV-storage capacity ratio on transient stability is investigated for system structural parameters. And then, the impact of PV low voltage ride-through control parameters on transient stability is analyzed for inverter control parameters. On this basis, adjustment measures for control parameters are studied to enhance the transient stability of the system, which can provide an example to refer for the planning and operation of grid-connected PV and energy storage systems.

Key words:PV and energy storage system; PV penetration rate; PV-energy storage capacity ratio; low voltage ride-through; transient stability

0 引言

光伏发电是全球碳减排的重要举措,其装机容量和在电网中的渗透率正在逐年升高^[1-2]。然而,大量电力电子化的光伏变流器接入电力系统会显著改变电网的暂态特性。同时,用于平滑光伏功率波

基金项目:国家电网有限公司西南分部科技项目(52998230000G)

动的储能装置与光伏设备共同接入电网会进一步使电网的暂态特性复杂化^[3],从而导致具有大规模光储系统的电网面临着重大的暂态稳定问题。

现有研究表明,系统光伏渗透率^[4]和储能装机容量^[5]对电网的暂态稳定性有影响,增大光伏渗透率会恶化系统暂态功角、频率和电压稳定性^[6-7]。对于储能系统,从平滑功率波动的角度来看,它可以平滑光伏系统的输出功率,这有利于系统的稳定

性^[8];但与此同时,基于电力电子变流器的储能系统在故障下过载能力、抗扰能力低,从而对系统暂态稳定性产生不利影响。因此,当光伏和储能联合运行时,迫切需要阐明大规模光储系统对电网暂态稳定特性的影响规律。

光储系统的接入给系统暂态特性带来影响的同时,其电力电子变流器的灵活控制也为提高系统暂态稳定性提供了有效手段。例如,实施光伏逆变器的低电压穿越控制策略是为了保持设备自身的稳定性,然后为电网提供功率支撑,进而提高电网的暂态稳定性^[9],如在故障穿越期间采用最优有功电流/无功电流比策略^[10-11]和自适应无功电流注入策略^[12]。因此,光储系统的故障穿越控制参数对系统的稳定性也有显著影响,阐明其影响规律对提高系统的暂态稳定性具有重要意义。

下面建立包含大规模光储系统的实际大电网仿真模型,结合同步发电机转子运动方程中的系统惯性常数理论,分析了光伏渗透率和储能光伏配置容量比(负荷水平不变,同步发电机装机容量不变)对电网暂态稳定性的影响,并考虑在光伏容量配置最大化的条件下,研究了采用合理的低电压穿越控制参数来提升电网暂态稳定的可行措施。

1 含大规模光储系统的电网结构及暂态稳定原理分析

1.1 光储系统的并网结构

在大型电网中,储能系统通常是集中配置的,从大电网整体角度出发,在光伏集群的并网点配置储能系统,可以实现双向功率流动。这种接入方式可以方便地对整个集群进行调节控制。光储系统的整体并网结构如图 1 所示,图中: P_{pv} 为光伏输出功率; P_{BESS} 为储能充放电功率。

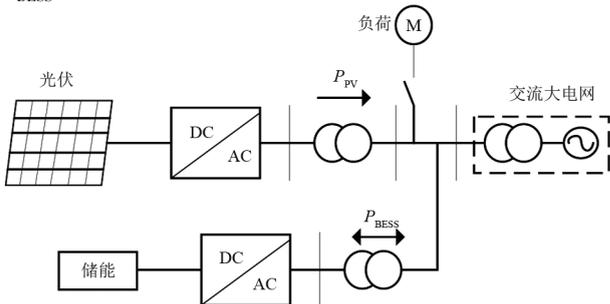


图 1 含大规模光储系统的电网结构

1.2 电力系统暂态稳定原理

电力系统暂态稳定是指电力系统遭受大扰动时,各同步发电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来运行状态的能力^[13]。而电力系统的固有惯量源于同步发电机组的旋转动能,转子转速与系统频率耦合从而抑制系统频率突变。因此,系统惯量影响转子转速从而影响系统恢复稳定能力,可表征电力系统暂态稳定特征^[14]。含有惯量的同步发电机转子运动方程为

$$J \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = T_m - T_e \quad (1)$$

式中: J 为转子转动惯量; δ_m 为转子功角; T_m 为原动机的机械输入转矩; T_e 为电转矩。

转动惯量以及转矩相关的中间转换变量公式可由式(2)描述。

$$\begin{cases} \delta_e = \frac{p}{2} \delta_m \\ P_m - P_e = \omega_s (T_m - T_e) \\ H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_s^2}{S} \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 为极对数; δ_e 和 ω_s 分别为转子电角度和同步角速度; P_m 和 P_e 分别为同步发电机的机械功率和电磁功率; S 为同步发电机容量。

由式(1)和式(2)可导出具有惯性常数 H 、功率 P_m 和 P_e 的转子运动方程为

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_e(t)}{dt^2} = P_m - P_e \quad (3)$$

进一步地,具有 n 个发电机的系统的惯性常数 H_s 表示为

$$H_s = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4)$$

式中: S_i 为第 i 台同步发电机的容量; H_i 为第 i 台同步发电机的单位惯性常数,典型值为 $2 \sim 10 \text{ s}$ ^[15]。

不同系统惯性常数的频率响应特性如图 2 所示,图中 ω_{ref} 为电网频率;横坐标 P 为同步发电机输出功率。图 2 表明系统的暂态稳定性随着系统惯性常数的减小而降低^[16]。而在含光储系统的电网中,随着光伏装机比例的增加、同步发电机装机容量比

例降低,系统总惯性常数降低,系统的暂态稳定性将进一步恶化。

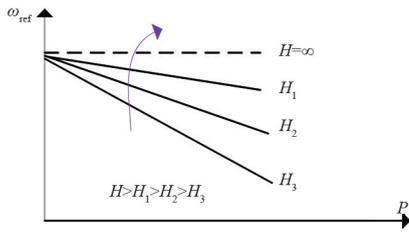


图 2 不同系统惯性常数的频率响应特性

2 基于某地区大电网的暂态稳定仿真分析

2.1 某地区大电网概况

对含大规模光储系统的某地区电网进行暂态仿真分析,图 3 为该地区电网的简化示意图。

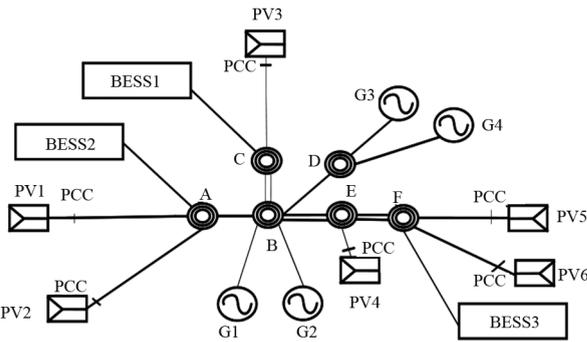


图 3 某地区电网

在图 3 中:B 为该地区 500 kV 中心枢纽电站; B 和 D 配备常规发电机组,A、C、E 和 F 为光伏储能汇集站;PV1~PV6 为光伏 (photovoltaic, PV) 系统; BESS1~BESS3 为集中式电池储能系统 (battery energy storage system, BESS); PCC 为公共耦合点 (point of common coupling, PCC),也是光伏系统的并网节点。光伏总装机容量为 6300 MW,储能装机容量为 1000 MW,常规发电机组装机容量为 5310 MW。

光伏渗透率是光伏装机容量与光伏和同步机装机容量之和的比值(以下简称渗透率)。当渗透率为 55.3%时,该地区电网中各发电机的初始容量如表 1 所示。

表 1 光伏渗透率为 55.3%时不同发电机类型的初始容量

发电机类型	初始容量/MW
光伏	6300
储能	1000
同步发电机	5310

2.2 光伏渗透率对系统暂态稳定性的影响

根据式(3),在同等负荷水平下,当增加光伏装机容量以提高渗透率时,同步发电机装机容量不变,系统的总惯性常数也会降低,这会弱化系统的暂态稳定性恢复能力。不同渗透率对应的系统总惯性常数如表 2 所示。

表 2 不同渗透率对应的系统总惯性常数

渗透率/%	光伏容量/MW	惯性常数/s
55.3	6300	4.47
63.7	9300	3.63
70.8	12 300	2.92

下面假设一条 500 kV 母线在 1.00 s 时发生三相短路故障,对系统暂态运行情况进行仿真分析,其中故障持续时间为 0.15 s。

图 4 展示不同渗透率下故障点附近 500 kV 母线电压波形。对比 55.3%与 63.7%渗透率下的母线电压:故障切除后(1.15 s),前者的电压提升速度比后者快了 0.12 pu/s;在恢复阶段(2.20 s 之后),前者的最大振幅波动(即波峰与波谷之差)比后者(0.1 pu)小 0.06 pu,前者的稳定时间也比后者快了 2.00 s。而当渗透率增至 70.8%时,母线电压无法恢复至正常水平,导致系统发生暂态失稳。

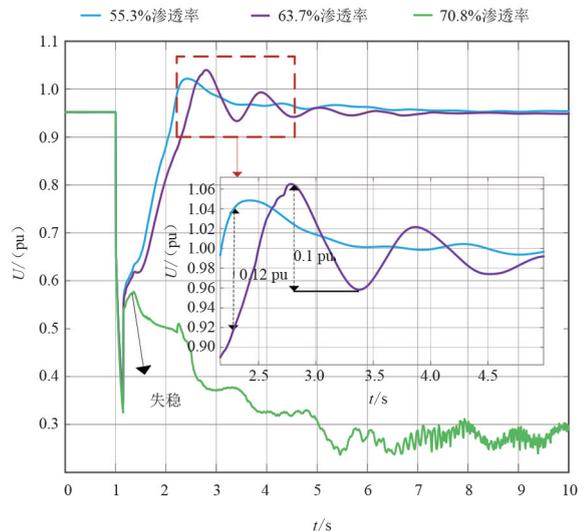


图 4 不同渗透率下的母线电压

图 5 进一步展示了不同渗透率下同步发电机相对功角波形。对比 55.3%与 63.7%渗透率下的同步发电机相对功角,前者的最大振幅波动比后者(30°)小 8°。而在 70.8%渗透率下,同步发电机的相对功角发散,系统发生暂态失稳。

图 6 展示了不同渗透率下电网频率波形。对比渗透率为 55.3%与 63.7%时的频率:在恢复阶段,前

者的最大振幅波动比后者(0.4 Hz)小 0.22 Hz,前者(2.80 s)的稳定时间比后者(5.00 s)快 2.20 s。而在 70.8%的渗透率下,电网频率逐渐发散,导致系统发生暂态失稳。

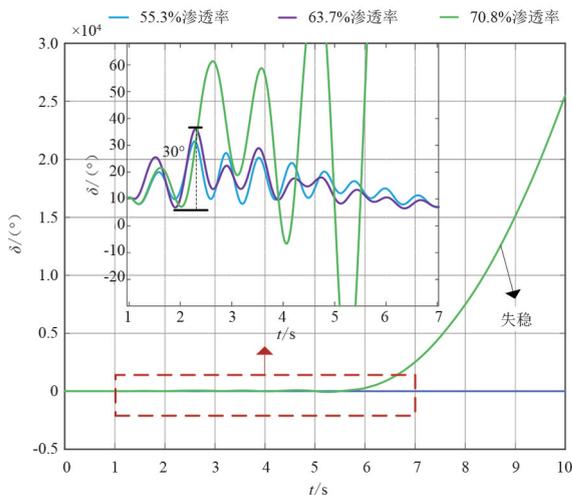


图 5 不同渗透率下的同步发电机相对功角

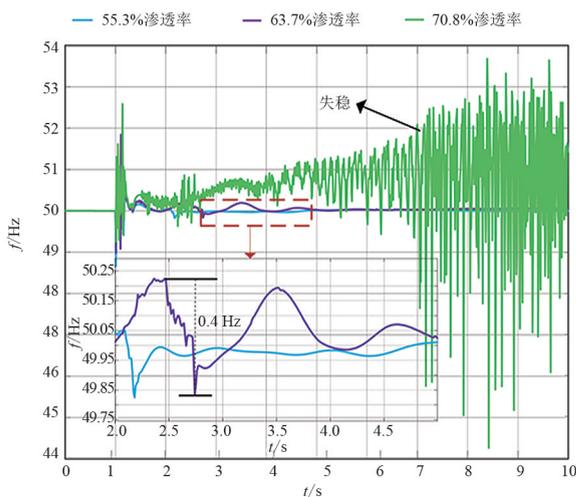


图 6 不同渗透率下的电网频率

由此可见,对于包含大规模光储系统的某地区电网,随着渗透率的增加(负荷水平不变,同步发电机装机容量不变),系统的惯性常数减小,抗干扰能力减弱,暂态稳定性降低。甚至,在较高的渗透率水平下,即便故障切除后系统仍无法恢复正常运行状态,发生失稳。

2.3 储能光伏配置容量比对系统稳定性的影响

储能系统具有充放电功能,可实现双向功率流动,配置在大型光伏并网系统中可以平滑功率波动,具有更好的调节特性。储能光伏配置容量比(以下简称容量比)是储能系统装机容量与光伏系统装机容量的比值。为分析容量比对系统稳定性的影响,同样假设一条 500 kV 母线在 1.00 s 时发生三相短

路故障,故障持续时间为 0.15 s。

图 7 展示了不同容量比下故障点附近 500 kV 母线电压波形。在恢复阶段,对比 30%、16%和 10%容量比下的电压,前者(0.04 pu)的最大振幅波动分别比后两者(0.08 pu 和 0.12 pu)小 0.04 pu 和 0.08 pu。此外,与后两者稳定时间(都为 7.20 s)相比,前者(4.50 s)稳定速度更快。

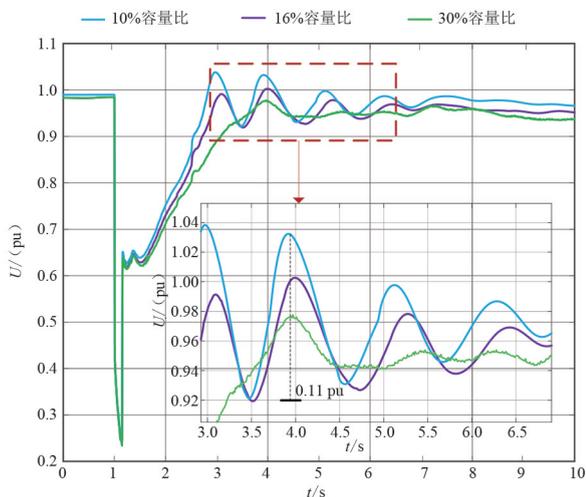


图 7 不同容量比下的母线电压

图 8 展示了不同容量比下电网频率波形。从图 8 中可以看出,在 30%容量比(0.06 Hz)下的最大振幅波动分别比 16%容量比(0.17 Hz)和 10%容量比(0.32 Hz)时的最大振幅变化小 0.11 Hz 和 0.26 Hz。

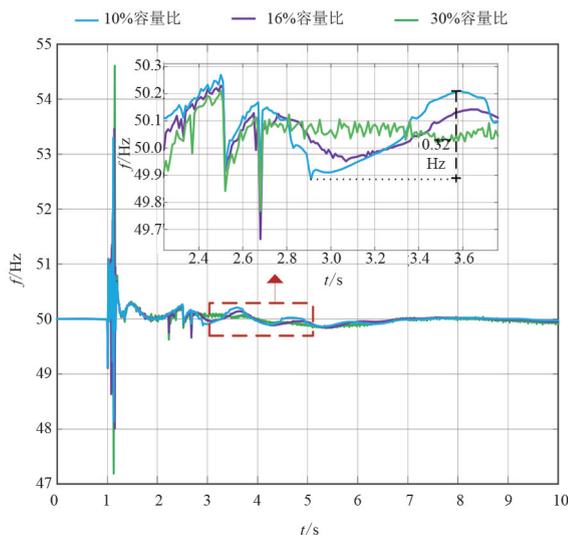


图 8 不同容量比下的电网频率

由上述分析可知,储能系统配置容量越大,其吸收故障后能量波动分量的能力越强,系统故障后的电压、频率、功角等波动分量越小,恢复稳定速度越快,电网越稳定。

2.4 低电压穿越有功电流系数对系统暂态稳定性的影响

当电网发生短路故障时,光储系统将进入低压穿越模式^[17]。随着光伏渗透率(负荷水平不变,同步发电机装机容量不变)的不断提高,光储系统低电压穿越过程中控制参数对电力系统的暂态稳定性的影响愈发明显^[18]。在故障期间采取的低电压穿越控制策略为指定电流控制策略,在此期间调整好控制参数能合理输出光储系统电流和功率,保证自身不脱网的同时支撑电网恢复稳定。指定电流控制策略如式(5)和式(6)所示。

$$i_{df}^* = K_{1_lp_LV} U_g + K_{2_lp_LV} I_{p0} \quad (5)$$

式中: i_{df}^* 为有功电流指令; $K_{1_lp_LV}$ 为与电网电压幅值正相关的有功电流系数; U_g 为故障点电压幅值; $K_{2_lp_LV}$ 为与光伏并网系统初始有功电流幅值相关的有功电流系数; I_{p0} 为初始有功电流幅值。

无功电流根据并网导则应设置为

$$i_{qf}^* = -1.5 \times (0.9 - U_g) \quad (6)$$

式中, i_{qf}^* 为无功电流指令。

由第 2.2 节可知,当光伏渗透率达到 70.8% 时,系统将发生暂态失稳问题。为分析改变光伏故障穿越电流控制指令对系统稳定性的影响,在光伏渗透率为 70.8% 的情况下,同样对一条 500 kV 母线在 1.00 s 时发生三相短路、故障持续时间为 0.15 s 的工况进行仿真分析。

图 9 展示了不同有功电流系数下故障点附近 500 kV 母线电压波形,其中 A、B、C 和 D 为依次增大的有功电流系数组合。

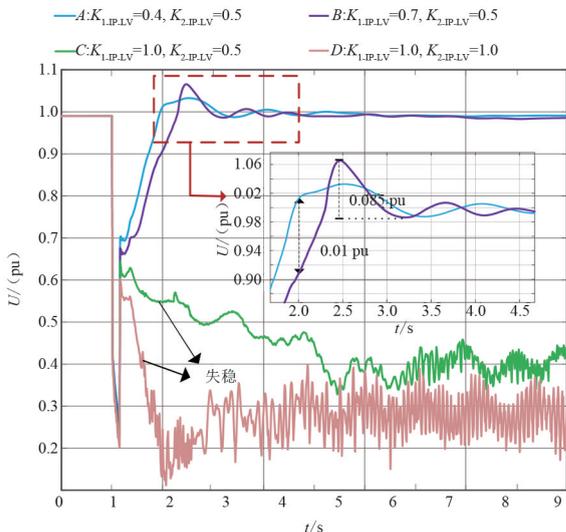


图 9 不同有功电流系数下的母线电压

在图 9 中,根据 A 组和 B 组控制参数下的母线电压对比可知,尽管两种情况下系统均是稳定的,但前

者故障切除后电压提升速度比后者快 0.100 pu/s,且在恢复阶段(2.00 s 后),前者的最大振幅(0.050 pu)波动比后者的最大振幅(0.085 pu)小 0.035 pu。而随着控制参数的增大,如在 C 组和 D 组的控制参数下,母线电压没有恢复至正常水平,电网处于暂态失稳的状态。

图 10 进一步展示了不同有功电流系数下同步发电机相对功角波形。在图 10 中,通过 A 组和 B 组控制参数下同步发电机的相对功角对比可知,尽管系统均能收敛稳定,但前者的最大振幅(13°)比后者的最大振幅(23°)小 10°,而且前者也具备更快的振幅波动衰减速度。另一方面,控制参数增大至 C 组和 D 组的控制参数时,同步发电机的相对功角发散,电网发生暂态失稳。

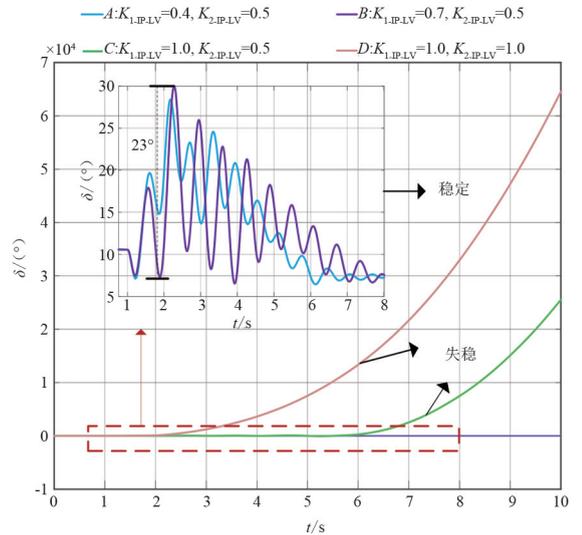


图 10 不同有功电流系数下同步发电机相对功角

图 11 展示了在不同有功电流系数下电网频率波形。在图 11 中,A 组控制参数下的系统频率的最

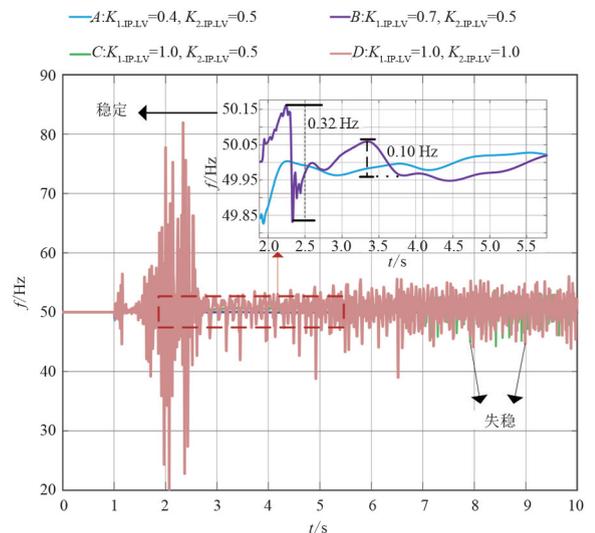


图 11 不同有功电流系数下的电网频率

大振幅波动为 0.04 Hz,比 B 组控制参数下的最大振幅变化(0.10 Hz)小 0.06 Hz。随着控制参数增大,在 C 组和 D 组控制参数下,电网频率持续振荡和发散,电网发生暂态失稳。

由此可知,在低电压穿越过程中减小有功电流系数有利于降低光伏脱网的概率,避免引起连锁反应扩大事故,而且还能增加光伏在故障期间支撑电网的贡献度,从而提升电网的暂态稳定性。

3 结 论

上面建立了包含大规模光储系统的某地区电网仿真模型,分析了光伏渗透率和储能光伏配置容量比对系统暂态稳定性的影响,研究了提升系统暂态稳定水平的光伏故障穿越控制参数改善措施。研究结论如下:

1)在负荷水平不变、同步发电机装机容量不变的情况下,随着光伏渗透率的增加,含光储系统的电网总惯性常数减小,系统暂态稳定性降低甚至不稳定;

2)增大储能光伏容量比可以提高其吸收系统振荡分量的效率,从而提升系统暂态稳定性;

3)在含大规模光储系统的电网中,通过减小低电压穿越有功电流系数来降低光伏脱网的概率,可以提升系统暂态稳定性。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会能源研究所可再生能源发展中心. 国际可再生能源发展报告 2019[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [2] 中国科学院创新发展研究中心, 中国先进能源技术预见研究组. 中国先进能源 2035 技术预见[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] 孙翠清. 储能技术在新能源电力系统的应用研究[J]. 电子世界, 2022(1): 27-28.
- [4] 刘行. 大规模新能源并网下可能连锁故障场景及防控措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [5] 陈海东, 蒙飞, 王庆, 等. 储能系统和新能源发电装机容量对电力系统性能的影响[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 477-485.
- [6] KROPOSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y C, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.
- [7] RAKHSHANI E, ROUZBEHI K, SANCHEZ A J, et al.

Integration of large-scale PV-based generation into power systems: A survey[J]. Energies, 2019, 12(8): 1425-1443.

- [8] 王皓怀, 汤涌, 侯俊贤, 等. 潮流计算和机电暂态仿真中风光储联合发电系统的实用等值方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 1-8.
- [9] 颜湘武, 梁白雪, 贾焦点, 等. 高渗透率光伏并网对系统暂态频率稳定性影响的量化评估[J]. 可再生能源, 2022, 40(9): 1232-1240.
- [10] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3573-3589.
- [11] PEI J X, YAO J, LIU R K, et al. Characteristic analysis and risk assessment for voltage-frequency coupled transient instability of large-scale grid-connected renewable energy plants during LVRT[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5515-5530.
- [12] WANG X W, YAO J, PEI J X, et al. Analysis and damping control of small-signal oscillations for VSC connected to weak AC grid during LVRT[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1667-1676.
- [13] 李响, 白首华, 颜铭. 大容量光伏电站并网稳定性分析及措施[J]. 电气应用, 2014, 33(22): 20-23.
- [14] 王康, 王碧阳, 李立, 等. 故障位置对交直流外送系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 190-196.
- [15] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Small signal stability assessment of power systems with increased penetration of photovoltaic generation: A case study[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 960-967.
- [16] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPA V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [17] HOSSAIN M J, SARA T K, MITHULANANTHAN N, et al. Control strategies for augmenting LVRT capability of DFIGs in interconnected power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2510-2522.
- [18] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. An overview of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9655-9670.

作者简介:

梁晓斌(1986),男,博士,高级工程师,主要从事电力系统稳定分析与控制等方面研究工作。

(收稿日期:2024-01-30)