

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241688

考虑电压稳定约束的新能源送出能力及 振荡风险影响的量化分析

范越¹, 任冲¹, 王智伟¹, 程林¹, 张宏桢²

(1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 新能源机组动态无功支撑能力弱, 随着新能源发电出力增大, 系统电压支撑能力下降, 电压稳定问题突出。现有研究缺乏考虑电压稳定性的新能源送出极限功率的量化评估方法。为此, 首先基于静态电压稳定分析判据, 推导了考虑电压稳定性的新能源理论最大发电功率解析表达式, 明确了理论最大有功功率与系统短路比、阻抗比、无功补偿容量等因素之间的量化关系, 提出了满足有功功率发电需求的最小无功补偿容量计算方法。然后, 通过基于数值模型的连续潮流法验证了所提方法的正确性和有效性。最后, 在考虑详细控制环节的时域模型中, 通过阻抗分析法, 初步验证了电压稳定水平与宽频振荡风险间的关联关系。研究成果可为快速、准确评估新能源送出系统安全裕度以及无功补偿容量需求, 分析新能源送出系统稳定水平提供参考和依据。

关键词: 电压稳定性; 安全裕度评估; 最大有功功率理论极限; 短路比

Quantitative analysis of new energy delivery capability considering voltage stability constraints and oscillation risk

FAN Yue¹, REN Chong¹, WANG Zhiwei¹, CHENG Lin¹, ZHANG Hongzhen²

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China; 2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Dynamic reactive power support capacity of new energy units is generally weak, and with the increase of new energy generation, the system's voltage support capacity declines, making voltage stability issue more prominent. Existing studies lack quantitative evaluation methods for determining the maximum deliverable new energy output under voltage stability constraints. To address this gap, this paper first derives an analytical expression for the theoretical maximum active power output of new energy sources considering static voltage stability criteria. The resulting formulation explicitly quantifies the relationship between the theoretical maximum active power and factors such as system short-circuit ratio, impedance ratio, and reactive power compensation capacity. A calculation method for the minimum reactive power compensation capacity to meet active power generation demands is also proposed. The correctness and effectiveness of the proposed method are then validated using continuous power flow analysis based on numerical modeling. Finally, using impedance-based analysis on a detailed time-domain model with full control loops, this paper preliminarily verifies the correlation between voltage stability levels and wideband oscillation risk. The research findings provide reference for rapid and accurate assessment of new energy delivery margins, determination of required reactive compensation capacity, and evaluation of the stability level of new energy delivery systems.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202455001A-1-1-ZN).

Key words: voltage stability; security margin assessment; theoretical maximum active power; short-circuit ratio

0 引言

近年来我国可再生能源发电量稳步增长, 风电、

光伏等新能源机组通过电压源变流器(voltage source converter, VSC)馈入交流电网是新能源接入的主要方式^[1-3]。新能源机组无功支撑能力弱、控制环节复杂, 随着新能源发电占比快速提高, 系统电压支撑能力急剧下降, 电压稳定问题突出, 并加剧了新能源机组振荡风险^[4-6], 考虑电压稳定约束的新能源最

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202455001A-1-1-ZN)

大送出功率缺乏量化计算方法以及关联因素分析,影响了新能源安全可靠送出。为此,研究考虑电压稳定限制的新能源最大送出功率计算方法以及无功裕度评估具有重要意义。

在新能源送出系统中,当新能源发电功率接近静态电压稳定极限时,新能源出力有功无功变化将导致汇集点交流电压大幅波动,增大失稳风险。近年来我国新疆、内蒙古等新能源富集区也发生了新能源功率大幅波动,引发电压下降甚至导致脱网的情况。目前已有大量文献对新能源接入系统电压稳定问题进行了研究,提出了相关电压稳定性评估指标,并通常采用连续潮流法^[7-10]和最优潮流法^[8-11]开展电压稳定性分析。

文献[15]提出了可应用于大规模风电汇集系统的静态电压稳定评价指标,可方便得到各节点的静态电压稳定裕度。文献[16]采用特征结构法,分析得出大型光伏电站的静态电压稳定判据和稳定裕度。文献[17]利用特征值-有功灵敏度指标分析了光伏并网有功功率不同、并网点不同时系统的最小特征值随有功功率的变化规律,为解决光伏容量、并网点等因素导致的静态电压问题提供了有效方法。文献[18]探讨了光伏渗透率与接入点对并网系统静态电压稳定性的影响,提出采用无功支撑系数和电压-有功功率灵敏度两个量化指标表征接入点对静态电压稳定性的影响程度。文献[19]针对新能源波动性及弱调节特性对电力系统静态电压稳定带来的影响,提出一种考虑源荷双侧不确定性的高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估方法,通过构建静态电压稳定期望裕度和静态电压稳定风险度两个指标对新能源接入系统的静态电压稳定性进行表征。短路比指标也被应用于评估新能源送出系统的静态电压稳定性。文献[20]从系统的雅克比传递函数矩阵得到小干扰稳定性的特征方程,进而基于特征根角度得到多馈入广义短路比定义及临界值。文献[21]提出了一种能够评估新能源多场站送出系统静态电压稳定性的裕度比指标,反映了短路容量、新能源功率和不同新能源间电气距离对静态电压稳定性的影响,但是该指标在计算静态电压稳定极限功率时未考虑新能源无功补偿量对极限功率的影响,工程实用性仍需进一步论证。

总体看来,现有研究对理解和完善新能源送出系统中的电压稳定性分析具有重要意义,但仍缺乏考虑电压稳定的最大送出功率计算方法,难以简单、直观地体现短路容量、新能源功率等关键因素对新能源送出系统静态电压稳定性的影响,缺少能够快

速、准确评估考虑电压稳定的新能源最大送出功率及无功补偿裕度的方法。

当VSC接入弱电网时,其控制稳定性将明显降低,宽频振荡问题凸显^[22],主要体现在5~300 Hz内的振荡^[23]。阻抗分析法将并网逆变器和电网系统视为两个独立的子系统,分别建立相应的阻抗模型,具有物理意义清晰、阻抗形式简单和适用范围广等优点,在分析宽频振荡机理方面起到了重要作用。文献[24]构建了光伏并网系统的阻抗模型,探讨了弱电网对系统稳定性的影响,指出谐振控制器引起的相位滞后是稳定性降低的主要原因。文献[25]利用阻抗分析法研究含静止无功补偿装置的光伏并网系统,发现控制延时是导致系统发生高频谐振失稳的关键因素。文献[26]构建了带有延时环节的永磁直驱风电机组的z域阻抗模型,并提出广义禁区判据方法分析系统稳定性。文献[27]建立了静止自然坐标系下含锁相环与前馈控制的直驱风机序阻抗模型,指出风电机组控制器会产生负阻值容性阻抗进而与电网感性阻抗发生RLC谐振,而电网强度的降低将恶化系统稳定性。然而,在目前的研究中,缺乏不同工况下电压稳定水平与振荡风险间关联关系的研究。值得一提的是,现有针对新能源宽频振荡的研究,通常聚集于锁相环特性及与控制环节交互作用的分析及优化,缺乏不同工况下电压稳定水平与振荡风险间关联关系的研究。

本文通过静态电压稳定分析方法,推导了新能源能够向交流电网注入的最大极限有功功率,明确了最大有功功率与短路比、阻抗比、无功补偿容量之间的解析表达式,提出了在满足有功功率输出情况下的无功补偿容量计算方法,通过连续潮流法验证了本文研究结论;并在考虑详细控制环节的时域模型中,通过阻抗分析法,初步验证了电压稳定水平与宽频振荡风险间的关联关系。为快速、准确地评估新能源送出系统安全裕度和无功补偿容量需求,分析新能源送出系统稳定水平提供参考和依据。

1 基于电压稳定性的新能源最大发电功率计算

1.1 新能源送出系统有功电压关系

在新能源送出系统中,随着有功功率增大,在无功调节装置动作前,接入点电压将随之下降。以某省级电网实际运行案例说明大规模新能源集中接入电网会导致电压失稳问题并伴有宽频振荡风险。该地区500 MW的风电场通过220 kV 28 km的输电线路接入新能源汇集站,该汇集站再通过500 kV

387 km 长线接入该省级电网,图1为该系统示意图。表 1 给出了系统参数,该场站的额定有功功率为 500 MW,某日该场站因主要无功补偿设备故障停运,无功调节能力为 0~150 Mvar。

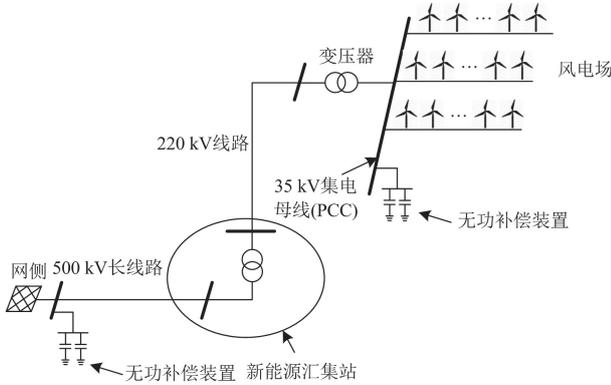


图 1 风电场接入系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind farm connected to grid

表 1 系统参数表

Table 1 Parameters of the system

额定 功率 P/MW	无功 功率 Q/Mvar	线路 电阻 R_g/Ω	线路 电抗 X_g/Ω	并网点短 路比 K_{SCR}
500	0~150	6.98	115.1205	1.45

在当日的实际运行中,由于风速快速增大导致风电场的有功出力迅速增加,图 2 给出了新能源大功率发电时,风电场送出有功功率、电压同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)录波曲线。可见,由于当日新能源快速增大,电网自动电压控制系统每 4 min 下达一次电压调整指令调节,未能及时跟踪有功功率快速增长,加之部分无功补偿设备处于检修状态,导致新能源场站随着功率增大电压不断下降,接近电压稳定极限,并伴有风电场功率振荡现象,反映出新能源有功与电压稳定及宽频振荡存在关联关系。因此,有必要深入研究新能源机组接入弱交流电网电压稳定性问题,量化分析限制新能源有功发电的主要因素,开展电压稳定与振

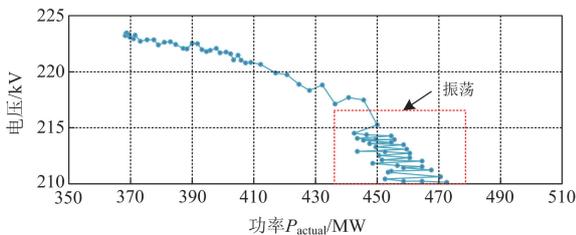


图 2 风电场送出线路 $P_{\text{actual}}-V$ 曲线

Fig. 2 $P_{\text{actual}}-V$ curve of transmission line connected to wind farm

荡风险的相关性分析。

1.2 新能源理论最大发电功率

本文建立了沙戈荒新能源变流器接入弱电网的分析模型,基于系统静态电压稳定判据,研究推导在电压稳定约束条件下,新能源变流器可以向交流电网传输的最大有功功率。由于本文研究的主要问题为新能源接入系统静态电压稳定问题,属于稳态分析范畴,新能源的发电单元、变流器及其控制系统等动态部件对静态电压稳定影响不大,为提高分析效率,根据研究问题可以不再对不同新能源发电单元、变流器及控制系统进行详细建模,而目前跟网型新能源机组统一的电流源外特性则对其静态电压问题具有重要影响,因此在本文推导过程中可以将新能源机组统一等效为电流源。

图 3 给出了新能源机组变流器接入系统的单线图,其中 \dot{V}_c 、 \dot{V}_p 、 \dot{V}_g 、 \dot{I}_g 、 P_{ac} 、 Q_{ac} 、 Z_g 分别为变流器端电压即新能源机端电压相量、集中汇集点(PCC)电压相量、交流等值电网出口电压相量、新能源机组向电网注入的电流相量、新能源机组向电网注入的有功功率和无功功率、电网侧的等效阻抗。

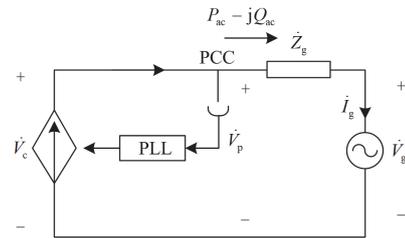


图 3 新能源变流器接入弱电网分析模型

Fig. 3 Analytical model of new energy converter access to weak grid

根据图 3,可得潮流公式为

$$\dot{V}_p = \sqrt{3}(R_g + jX_g)\dot{I}_g + \dot{V}_g \quad (1)$$

式中: R_g 、 X_g 分别为电网侧的等效电阻和电抗。

以交流等值电网出口电压作为参考电压,即 $\dot{V}_g = V_g \angle 0^\circ$ 。将注入电网的电流 \dot{I}_g 用新能源机组注入系统的有功功率 P_{ac} 、并网电网电压 \dot{V}_p^* 和无功功率 Q_{ac} 表示,可得

$$\dot{I}_g = (P_{\text{ac}} - jQ_{\text{ac}})/(\sqrt{3}\dot{V}_p^*) \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得

$$\dot{V}_p = (R_g + jX_g) \times \frac{P_{\text{ac}} - jQ_{\text{ac}}}{\dot{V}_p^*} + \dot{V}_g \quad (3)$$

由于 $\dot{V}_p \dot{V}_p^* = |\dot{V}_p|^2$, 将其用实部和虚部表示为

$$\dot{V}_p = V_{pi} + jV_{pj}, \text{ 将式(3)左右两侧乘以 } \dot{V}_p^* \text{ 可得}$$

$$V_{pi}^2 + V_{pj}^2 = R_g P_{ac} + X_g Q_{ac} + j(X_g P_{ac} - R_g Q_{ac}) + V_g(V_{pi} - jV_{pj}) \quad (4)$$

将式(4)的实部和虚部分别移至等号两侧, 等式相等的条件是等号两边等于0, 可得

$$V_{pj} = (X_g P_{ac} - R_g Q_{ac})/V_g \quad (5)$$

$$V_{pi}^2 - V_g V_{pi} + V_{pj}^2 - R_g P_{ac} - X_g Q_{ac} = 0 \quad (6)$$

将式(6)看成关于 V_{pi} 的一元二次方程, 根据韦达定理, V_{pi} 的解为

$$V_{pi} = \frac{V_g \pm \sqrt{\Delta}}{2} \quad (7)$$

$$\Delta = V_g^2 - 4V_{pj}^2 + 4R_g(P_{ac} + aQ_{ac}) \quad (8)$$

式中: a 为阻抗比。

将式(5)代入式(8)可得

$$\Delta = -\frac{4P_{ac}^2 X_g^2}{V_g^2} + P_{ac} \left(4R_g + \frac{8Q_{ac} R_g X_g}{V_g^2} \right) +$$

$$4aQ_{ac} R_g - \frac{4Q_{ac}^2 R_g^2}{V_g^2} + V_g^2 \quad (9)$$

当 $\Delta=0$ 时, 并网点电压有唯一物理解, 对应于系统临界稳定状态, 此时取得最大发电功率 P_{max} , 其表达式为

$$P_{max} = \frac{K_1 \pm \sqrt{K_1^2 - 4K_2}}{2} \quad (10)$$

其中

$$K_1 = \frac{R_g(V_g^2 + 2Q_{ac}X_g)}{X_g^2} \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{4Q_{ac}^2 R_g^2 - 4aQ_{ac} R_g V_g^2 - V_g^4}{4X_g^2} \quad (12)$$

根据图3所示功率的参考方向, 式(10)计算所得正值表示新能源机组向系统中注入的有功功率, 而式(10)计算所得负值则表示新能源机组从系统中吸收的有功功率。

1.3 新能源最大发电功率影响因素量化评估

新能源变流器并网点的短路比如式(13)所示。

$$K_{SCR} = \frac{V_g^2}{P_n \sqrt{R_g^2 + X_g^2}} \quad (13)$$

式中: P_n 为新能源机组额定有功功率。短路比指标可用于评估新能源汇集接入点交流电网系统强度,

在高压输电系统中 $X_g \gg R_g$ 。因此 $a \gg 1$, 可将系统等值接入电阻、电抗表示为

$$R_g \approx V_g^2 / (aP_n K_{SCR}) \quad (14)$$

$$X_g \approx V_g^2 / (P_n K_{SCR}) \quad (15)$$

式中: K_{SCR} 为短路比。

将式(14)、式(15)代入式(11)、式(12), K_1 、 K_2 可改写为

$$K_1 = (P_n K_{SCR} + 2Q_{ac})/a \quad (16)$$

$$K_2 = (4Q_{ac}^2 - 4Q_{ac} a^2 P_n K_{SCR} - a^2 P_n^2 K_{SCR}^2)/(4a^2) \quad (17)$$

设 P_{ac_us} 为电压失稳点新能源机组最大有功功率与额定功率的比值, 可得

$$P_{ac_us} = \frac{P_{max}}{P_n} = \frac{\left(K_{SCR} + \frac{2Q_{ac}}{P_n} \right) \pm \sqrt{(1+a^2) \left(K_{SCR}^2 + 4K_{SCR} \frac{Q_{ac}}{P_n} \right)}}{2a} \quad (18)$$

由式(18)可以看出, 在电压失稳之前, 新能源机组可以向交流电网注入的最大有功功率是新能源无功支撑能力、系统强度、接入系统的电抗和电阻比值的函数。

$P_{ac_us} > 1$ 表示当新能源向交流电网注入额定功率 P_n 时, 系统可以维持静态电压稳定; $P_{ac_us} = 1$ 表示当新能源向交流电网注入额定功率 P_n 时, 系统处于静态电压稳定的临界状态; $P_{ac_us} < 1$ 则表示在新能源向交流电网注入的有功功率达到额定功率 P_n 之前, 系统已经发生电压失稳。

1.4 短路比、阻抗比测量误差鲁棒性分析

式(18)为电压失稳点新能源机组最大有功功率与额定功率的比值。为验证所提方法在考虑短路比、阻抗比的测量误差后是否具有鲁棒性, 考虑当短路比和阻抗比的测量误差分别为 $\pm 5\%$ 时, 比较电压失稳点新能源机组最大有功功率的理论值 P_{ac_us} 与实际值 P'_{ac_us} 。

取并网点短路比 $K_{SCR} = 2.5$ 。剩余参数取 $P_n = 0.55 \text{ p.u.}$ 、 $Q_{ac} = 0.13 \text{ p.u.}$ 、 $a = 10$ 。表2给出不同测量误差类型下的偏差量。只需要考虑实际值 P'_{ac_us} 小于理论值 P_{ac_us} 的案例, 根据表2可知, 在短路比偏差 $+5\%$ 且阻抗比偏差 -5% 时, 实际值与理论值的偏差达到最大值 -4.7% , 因此, 新能源机组的最大输出功率只需要按照理论值的 90% 考虑, 留有 10%

的裕度，就可以避免由于测量误差导致的电压稳定性问题。

表 2 测量误差类型及造成的偏差百分比
Table 2 Types of measurement errors and the percentage of bias caused

短路比 偏差/%	阻抗比 偏差/%	理论值 P_{ac_us}	实际值 P'_{ac_us}	偏差/%
+5	0	1.623	1.553	-4.31
-5	0		1.693	4.31
0	+5		1.632	0.55
0	-5		1.616	-0.43
+5	+5		1.562	-3.8
+5	-5		1.546	-4.7
-5	+5		1.702	4.9
-5	-5		1.685	3.8

1.5 满足新能源有功发电需求的最小无功补偿容量计算

由电压失稳点新能源机组最大有功功率与额定功率的比值(式(18))可以看出，当网架拓扑和运行方式一定时，短路比 K_{SCR} 以及阻抗比 a 基本不变，而新能源向电网注入的理论最大有功功率将直接与新能源场站的无功功率 Q_{ac} 相关。当给定新能源机组最大有功功率与额定功率的比值 P_{ac_us} ，通过式(18)可以求解得到系统所需要的无功功率 Q_{ac} ，为此可提供一种满足额定有功功率送出需求的无功补偿容量量化评估方法。

根据式(18)，设 $P_{ac_us} = 1$ ，即可推导得到电压失稳点新能源送出有功功率为额定值时，系统所需的无功补偿容量。以高压电网的阻抗比 $a = 10$ 、短路比 K_{SCR} 相对于阻抗比 a 较小的 $K_{SCR} = 1$ 为例，新能源场站所需的无功补偿容量应满足式(19)。

$$\frac{Q_{ac}}{P_n} \geq \frac{a}{1+a} \approx 0.91 \quad (19)$$

2 算例验证

基于潮流计算软件，通过连续潮流法计算考虑静态电压稳定约束的变流器最大传输功率，分别建立不同短路比、不同线路等值阻抗比和不同无功功率支撑下的仿真算例，利用控制变量法验证不同因素对新能源最大送出能力的影响，并将理论分析计算得到的最大传输功率与仿真进行了对比分析，验证了理论推导的新能源传输功率极限算法的正确性和有效性。

2.1 短路比对新能源送出能力的影响

以图 3 所示的新能源单机系统进行算例验证，

系统参数设置为： $P_n = 0.55 \text{ p.u.}$ 、 $Q_{ac} = 0.13 \text{ p.u.}$ 、 $a = 10$ ，根据式(18)可得不同短路比情况下，电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 及其与额定功率的比值 P_{ac_us} ，相关计算结果见表 3。

表 3 给出了通过连续潮流仿真计算所得到的新能源机组最大传输功率与额定功率的比值 $P_{ac_us_sim}$ 。对比由式(18)计算所得 P_{ac_us} 与通过仿真计算所得 $P_{ac_us_sim}$ 可知，两者数值基本一致(最大误差不超过 5%)，故依据式(18)可以得到不同短路比情况下，电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 。

表 3 不同短路比情况下，电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 及其与额定功率的比值 P_{ac_us}

Table 3 Maximum active power and its ratio to the rated power of the new energy unit at the point of voltage destabilization under different short-circuit ratios

K_{SCR}	$P_{max}/\text{p.u.}$	P_{ac_us}	$P_{ac_us_sim}$
1	0.4260	0.7745	0.7761
1.5	0.579	1.053	1.055
2	0.7388	1.3432	1.3508
3	1.0463	1.9024	1.9236
4	1.3522	2.4586	2.5061
5	1.6574	3.0134	3.0719
6	1.9621	3.5675	3.5793
7	2.2666	4.1211	4.2017
8	2.5710	4.6745	4.7647
9	2.8752	5.2277	5.2781
10	3.1794	5.7808	5.8737

图 4 给出了不同短路比情况下的仿真计算 $P-V$ 曲线，揭示了短路比对新能源最大送出能力的影响。图 4 中的曲线为潮流计算收敛部分。

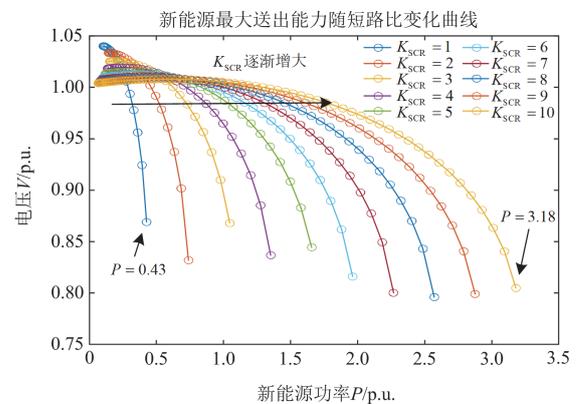


图 4 不同短路比情况下的 $P-V$ 曲线
Fig. 4 $P-V$ curves for different short-circuit ratios

由表 3 和图 4 可知, 在保持线路等值阻抗比和无功功率恒定的前提下, 新能源最大送出能力和短路比呈正相关。比较 $K_{SCR} = 1$ 和 $K_{SCR} = 10$ 的两个算例, 考虑新能源机组额定容量为 0.55 p.u., 两个系统中新能源的最大送出能力分别为 0.4260 p.u. 和 3.1794 p.u., 后者是前者的 7.463 倍, 说明电网强度越高, 新能源最大送出能力越强。

2.2 线路等值阻抗比对新电源送出能力的影响

当系统参数设置为: $P_n = 0.55$ p.u.、 $Q_{ac} = 0.13$ p.u.、 $K_{SCR} = 2$, 根据式(18)可得不同线路等值阻抗比情况下, 电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 及其与额定功率的比值 P_{ac_us} , 相关计算结果见表 4。对比由式(18)计算所得 P_{ac_us} 与通过仿真计算所得 $P_{ac_us_sim}$ 可知, 两者数值基本一致(最大误差不超过 5%), 故依据式(18)可以得出不同线路等值阻抗比情况下, 电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 。

表 4 不同线路等值阻抗比情况下, 电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 及其与额定功率的比值 P_{ac_us}

Table 4 Maximum active power and its ratio to the rated power of the new energy unit at the point of voltage destabilization with different line-equivalent impedance ratios

a	$P_{max}/p.u.$	P_{ac_us}	$P_{ac_us_sim}$
10	0.7388	1.3432	1.3436
10.5	0.7352	1.3368	1.3367
11	0.7320	1.3310	1.3321
11.5	0.7291	1.3256	1.3256
12	0.7264	1.3208	1.3207
12.5	0.7240	1.3163	1.3172
13	0.7217	1.3122	1.3131
13.5	0.7197	1.3085	1.3091
14	0.7177	1.3050	1.3049
14.5	0.7159	1.3017	1.3026

图 5 给出了不同线路等值阻抗比情况下的仿真计算 $P-V$ 曲线, 揭示了线路等值阻抗比对新电源最大送出能力的影响。

由表 4 和图 5 可知, 在保持短路比和无功功率恒定的前提下, 新能源最大送出能力和线路等值阻抗比呈负相关。比较 $a = 10$ 和 $a = 14.5$ 的两个算例, 两者新能源的最大送出能力分别为 0.7388 p.u. 和 0.7159 p.u., 前者是后者的 1.03 倍, 说明电网系统线路等值阻抗比越小, 新能源送出能力越强。

2.3 无功功率对新能源送出能力的影响

当系统参数设置为: $P_n = 0.55$ p.u.、 $a = 10$ 、 $K_{SCR} = 1$, 根据式(18)可得在不同无功功率 Q_{ac} 情况

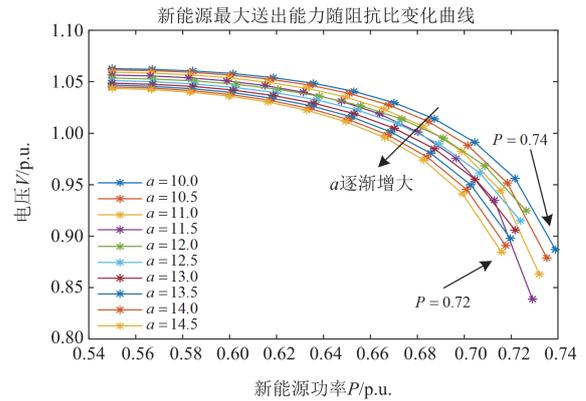


图 5 不同线路等值阻抗比情况下的 $P-V$ 曲线

Fig. 5 $P-V$ curves for different line-equivalent impedance ratios

下, 电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 及其与额定功率的比值 P_{ac_us} , 相关计算结果见表 5。对比由式(18)计算所得 P_{ac_us} 与通过仿真计算所得 $P_{ac_us_sim}$ 可知, 两者数值基本一致(最大误差不超过 5%), 故依据式(18)可以有效获得不同无功功率情况下, 电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 。

表 5 不同无功功率情况下, 电压失稳点新能源机组最大有功功率 P_{max} 及其与额定功率的比值 P_{ac_us}

Table 5 Maximum active power and its ratio to the rated power of the new energy unit at the point of voltage destabilization with different reactive power

$Q_{ac}/p.u.$	$P_{max}/p.u.$	P_{ac_us}	$P_{ac_us_sim}$
0	0.3039	0.5525	0.5526
0.5	0.6726	1.2229	1.2297
1	0.9224	1.6771	1.6816
1.5	1.1312	2.0568	2.0580
2	1.3172	2.3949	2.3966
2.5	1.4879	2.7053	2.7060
3	1.6477	2.9958	2.9961
3.5	1.7990	3.2709	3.2732
4	1.9435	3.5337	3.5347
4.5	2.0825	3.7864	3.7879

图 6 给出了不同无功功率情况下的仿真计算 $P-V$ 曲线, 揭示了新能源无功功率对其最大送出能力的影响。

由表 5 和图 6 可知, 在保持短路比和线路等值阻抗比恒定的前提下, 新能源最大送出能力和无功功率呈正相关。比较 $Q_{ac} = 0$ 和 $Q_{ac} = 4.5$ p.u. 的两个算例, 两者新能源的最大送出能力分别为 0.3039 p.u. 和 2.0825 p.u., 后者是前者的 6.85 倍, 说明新能源无功支撑能力越强, 其有功送出能力越强。

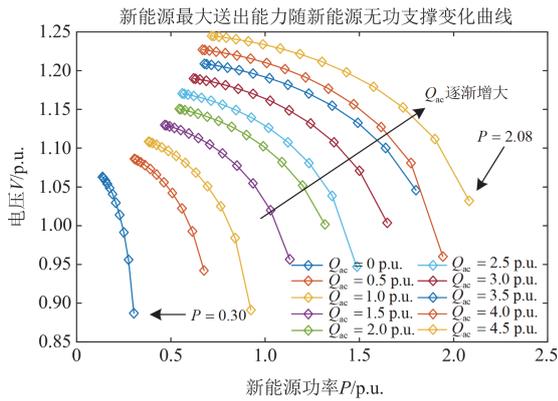


图 6 不同无功功率情况下的 P-V 曲线

Fig. 6 P-V curves for different reactive power

3 新能源送出系统电压稳定水平对宽频振荡影响分析

3.1 仿真分析

通过近年来发生的新能源宽频振荡事件的深入分析, 由于跟网型新能源机组可以等效为电流源, 其接入点功率-电压曲线与定功率负荷特性类似, 存在静态电压失稳拐点。从电压稳定性的角度来看, 随着有功功率持续增大, 电压稳定水平下降, 逆变器电感电流经电网阻抗产生的电压扰动增大, 电压有功灵敏系数 ($|dv/dp|$) 增加, 新能源机组有功微小波动时将引发电压大幅变化。该电压扰动通过锁相环影响电流环控制的输出, 最终作用于逆变器电感电流, 该电网阻抗和锁相环所构成的环路更易导致变流器并网系统在弱电网下振荡。

阻抗分析法是分析新能源发电设备接入电网稳定性的常用方法, 由于新能源发电装备的阻抗模型是小信号阻抗模型, 所以其阻抗特性除了和本身的控制方法、控制参数和电路结构有关外, 还与稳定运行工作点有关。该方法主要分为两步: 1) 将目标系统一分为二, 得到电源子系统和负荷子系统两部分, 建立两者的阻抗模型; 2) 利用 Nyquist 稳定判据分析电源和负荷两个子系统的阻抗比, 进而判断接入系统的逆变器是否可以稳定运行。跟网型逆变器接入电网的小信号描述如图 7 所示, 并网电流的表达式可表示为

$$I_g(s) = \left[I_s(s) - \frac{U_g(s)}{Z_{inv}(s)} \right] \cdot \frac{1}{1 + Z_g(s)/Z_{inv}(s)} \quad (20)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; $I_g(s)$ 为并网电流; $I_s(s)$ 、 $Z_{inv}(s)$ 分别为跟网型逆变器通过诺顿等效获得的理想电流源及其输出阻抗; $U_g(s)$ 、 $Z_g(s)$ 分别为电网电压及其阻抗值。

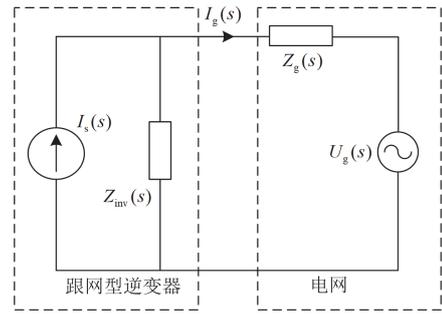


图 7 跟网型逆变器接入电网的小信号描述

Fig. 7 Small signal descriptions of grid connected inverters

如果电源子系统和负荷子系统都能稳定运行, 则 $I_s(s)$ 、 $U_g(s)$ 和 $Z_{inv}(s)$ 是稳定的, 并网电流 $I_g(s)$ 的稳定性取决于 $1/(1 + Z_g(s)/Z_{inv}(s))$, 其等效于正向通道增益为 1、负反馈通道增益为 $Z_g(s)/Z_{inv}(s)$ 的闭环传递函数。运用 Nyquist 稳定判据对阻抗比 $Z_g(s)/Z_{inv}(s)$ 进行分析, 即可判断系统的稳定性。

针对第 2 节单机无穷大仿真系统, 本节构建了永磁直驱风力发电并网逆变器详细控制系统的仿真模型, 其拓扑结构和控制框图如图 8 所示。 v_a 、 v_b 和 v_c 为并网点电压; i_a 、 i_b 和 i_c 为流过并网逆变器侧电感电流; L_f 、 C_f 分别为并网逆变器的滤波电感、滤波电容; L_g 为电网侧的等效电感; v_{ga} 、 v_{gb} 与 v_{gc} 和 i_{ga} 、 i_{gb} 与 i_{gc} 分别为电网三相电压和流过 L_g 的三相电流; I_{dr} 、 I_{qr} 分别为同步旋转坐标系下 d 、 q 轴输出电流指令; K_d 为前馈解耦增益系数; K_f 为电压前馈系数。

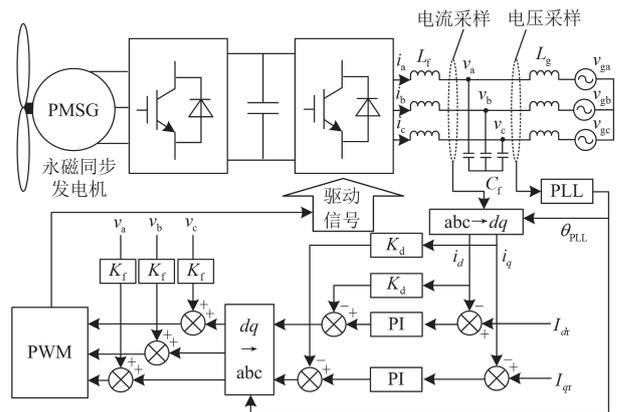


图 8 永磁直驱风力发电并网逆变器的拓扑结构和控制框图
Fig. 8 Topology and control block diagram of permanent magnet direct drive wind power generation grid-connected inverter

针对图 8 采用静止自然坐标系下的序阻抗建模方法, 通过分析新能源送出系统正负序阻抗比

$Z_{gp}(s)/Z_{invp}(s)$ 、 $Z_{gn}(s)/Z_{invn}(s)$ 的 Nyquist 图, 判断系统是否存在振荡风险。其中, $Z_{invp}(s)$ 、 $Z_{invn}(s)$ 分别为变流器的正、负序阻抗, $Z_{gp}(s)$ 、 $Z_{gn}(s)$ 分别为网侧正负序阻抗, 且 $Z_{gp}(s) = Z_{gn}(s) = Z_g(s)$ 。表 6 给出了系统的初始参数。

表 6 系统初始参数

Table 6 System initial parameters

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 V_{dc}/V	700	PI 控制器的 k_{p-i}	0.0343
电网侧电压 V_g/V	311	PI 控制器的 k_{i-i}	45.7143
滤波电感 L_f/mH	3	电压前馈参数 k_r	0.0029
滤波电容 $C_f/\mu F$	20	前馈解耦系数 k_d	0.0027
R_f/Ω	1.5	锁相环的 k_{p-PLL}	0.266
额定有功功率	10	锁相环的 k_{i-PLL}	11
P_n/MW	10		
开关频率 f_s/Hz	20 000		

新能源场站大都通过长线路接入主网, 电网阻抗对系统稳定性产生较大影响。图 9 给出了不同电网阻抗参数下, 永磁直驱风电机组变流器阻抗和电网阻抗交互波特图。中频段范围内(150~500 Hz), $Z_{invp}(s)$ 和 $Z_{invn}(s)$ 的相位都位于第三象限, 即永磁直驱风电机组变流器序阻抗的实部和虚部均为负, 呈现负电阻和电容特性; $Z_g(s)$ 的相位位于第一象限, 即电网阻抗的实部和虚部均为正, 呈现正电阻和电感特性。因此, 若永磁直驱风力发电并网逆变器的序阻抗与电网的序阻抗在中频段发生交汇, 在交汇频率处永磁直驱风力发电并网逆变器的序阻抗中负

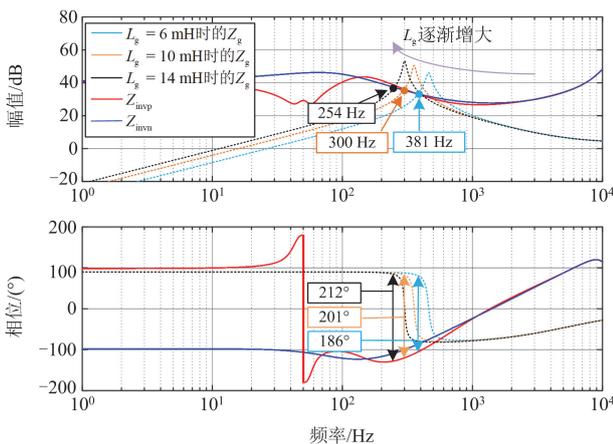


图 9 不同电网阻抗参数下, 永磁直驱风力发电并网逆变器阻抗和电网阻抗交互波特图

Fig. 9 Interactive Bode plots of PV grid-connected inverter impedance and grid impedance under different grid impedance parameters

电阻分量的绝对值大于电网序阻抗中正电阻的值, 那么整个并网体系的等效电阻将转变为负值, 此时会引发振荡风险。此外, 根据图 9 可知, 随着电网阻抗的增加, 永磁直驱风力发电并网逆变器的序阻抗与电网序阻抗曲线的交汇点向低频转移, 对应并网系统的阻尼变弱, 说明电网阻抗越大系统越容易发生振荡风险。基于上述分析, 降低电网强度并按照第 2 节方法, 通过调整送出功率、无功支撑等因素, 得到不同的 dv/dp 下运行工况。

图 10 为不同 dv/dp 条件下, 新能源送出系统的正、负序阻抗比的 Nyquist 图。由图 10 可以看出, 随着 $|dv/dp|$ 增大, Nyquist 曲线变化明显, 曲线将更容易包围 $(-1, j0)$ 点, 系统越不稳定。当 $dv/dp = -0.169$ 时, Nyquist 曲线包围了 $(-1, j0)$ 点, 系统在部分频段下将存在振荡风险。从图 4—图 7 可见, 当 $|dv/dp|$ 增大时, 系统电压和有功功率均存在较大变化, 从而导致极点产生较大的偏移, 对稳定性影响更大。

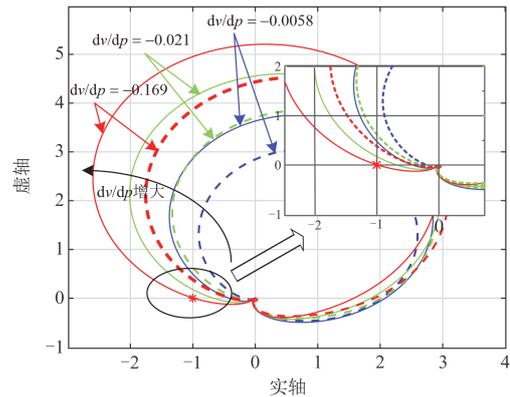


图 10 不同 dv/dp 下正、负序阻抗的 Nyquist 图

Fig. 10 Nyquist plot of positive and negative impedance under different dv/dp

图 11 给出了 $dv/dp = -0.169$ 工况下, 发生扰动后新能源变流器送出系统机组的电压、电流及有功功率时域仿真曲线, 可见, 该工况下扰动后系统发生宽频振荡, 验证了 dv/dp 与振荡稳定裕度关系更加密切, 能够一定程度上反映宽频振荡风险大小。但仍需要说明的是, 宽频振荡还与变流器控制方法、控制参数和接入系统电路结构等多种因素相关, 在给定存在宽频振荡风险的系统中随着 $|dv/dp|$ 指标增大, 振荡风险将进一步加剧。

3.2 案例分析

基于第 1 节和第 3 节的分析方法, 回顾 1.1 节中电网的实际案例根据式(18)可知, 当无功功率最大时取得电压失稳点新能源机组的最大有功功率,

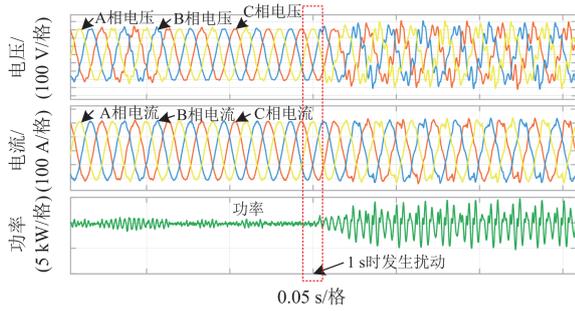


图 11 新能源接入弱电网扰动后机组电压、电流和有功功率曲线

Fig. 11 Voltage, current and active power curves after weak grid disturbance for new energy connection

即 $P_{\max} = 522 \text{ MW}$ 。根据图 2 新能源大发时风电场送出有功功率、电压 PMU 录波曲线，随着风速的增大，风电场的输出功率逐渐接近系统的输出功率极限，由于当日该风电场无功支撑能力不足，风电场并网点电压大幅下降，当输出功率达到 450 MW 时，送出功率的稳定裕度仅为 13.8%，电压有功灵敏系数 $|dv/dp|$ 达 1.8，诱发了风电场功率振荡现象，从而验证了上文的理论分析结论：1) 随着送出功率增大，在新能源场站无功支撑能力不足情况下，电压稳定裕度将快速下降；2) 随着电压裕度降低，电压有功灵敏系数增大还将加剧系统振荡风险。但需要说明的是，新能源场站振荡风险与变流器控制策略参数及运行工况等多种因素相关，本文所提出的不同工况下电压灵敏度与宽频振荡风险关联关系在电网生产运行中具有一定指导作用。

4 结论

本文基于静态电压稳定分析方法，推导了新能源能够向给定交流电网注入的最大有功功率量化计算方法，并给出了含有短路比、阻抗比和无功支撑能力等常用变量的解析解，通过仿真验证了方法的准确性和有效性，得出以下结论。

1) 在非常强的交流电网中，如系统短路比 K_{SCR} 超过 10，按照典型 330 kV 高压输电线路等值阻抗比计算，新能源机组临界电压失稳功率约为额定功率的 7 倍，此时，新能源机组无功支撑能力影响将非常小。因此，在这种电网强度条件下，新能源机组采用单位功率因数的控制策略更为合理。

2) 在非常弱的交流电网中，如沙戈荒新能源接入电网末端场景中，由于 $Q_{\text{ac}}/K_{\text{SCR}}$ 影响将大幅增大，新能源机组可以与交流电网交换的最大有功功率可能小于其额定有功功率，具体取决于新能源变流器可以提供无功支撑的能力，例如，当 $K_{\text{SCR}} = 1$ 时，

临界失稳功率将为额定功率的 0.77 倍。

3) 在系统短路比、系统等值阻抗已知的情况下，可根据本文方法计算当前新能源机组无功裕度，以评估当前新能源机组电压稳定裕度，从而实现新能源机组电压稳定水平实时量化评估。

4) 电压稳定水平与系统宽频振荡风险存在较强相关性，在电压稳定水平下降的工况下，系统宽频振荡风险进一步增大，考虑新能源运行工况不确定性，需要强化变流器接入系统电压稳定水平评估，保证电压稳定水平。

参考文献

- [1] 杜文娟, 郝向坤, 陈珏. 光伏场经柔直并网振荡稳定性分析与抑制方法研究[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 2-11, 51.
- [2] 赵文梦, 陈鹏伟, 许昭, 等. 直流配电系统虚拟惯性控制阻尼增强特性分析及参数设计[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(23): 136-144.
- [3] LI P, ADAM G P, HOLLIDAY D, et al. High power density STATCOM with extended reactive power control range[J]. International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2015, Palermo, Italy: 710-715.
- [4] 王进钊, 严干贵, 刘侃. 基于交替方向隐式平衡截断法的直驱风电场次同步振荡分析的模型降阶研究[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 850-858.
- [5] 戴礼国, 杨浩, 陈力, 等. 基于深度强化学习的风电柔直并网系统次同步振荡抑制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 1-7, 91.
- [6] 徐衍会, 任晋, 田鑫, 等. 综合提升新能源高占比受端电网小干扰和暂态电压稳定性的 SVG 优化配置方法[J].

- 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 119-130.
- XU Yanhui, REN Jin, TIAN Xin, et al. An SVG optimal configuration method for enhancing small disturbance and transient voltage stability in a receiving-end power grid with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 119-130.
- [7] 杨可昕, 鲍颜红, 任先成, 等. 直接电压控制构网型变频器控制参数暂态稳定影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 20-30.
- YANG Kexin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Analysis of transient stability effects of control parameters for direct voltage control grid-forming converters[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 20-30.
- [8] 陈厚合, 黄亚磊, 姜涛, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流系统电压稳定分析与控制[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2429-2435.
- CHEN Houhe, HUANG Yalei, JIANG Tao, et al. Voltage stability analysis and control for AC/DC system with VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2429-2435.
- [9] 康卓然, 张谦, 陈民权, 等. 适用于电力系统暂态稳定分析的网络电压解析算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 32-38.
- KANG Zhuoran, ZHANG Qian, CHEN Minquan, et al. Research on network voltage analysis algorithm suitable for power system transient stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 32-38.
- [10] 徐成司, 王子翰, 董树锋, 等. 基于潮流雅可比行列式的静态电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2096-2108.
- XU Chengsi, WANG Zihan, DONG Shufeng, et al. Static voltage stability analysis based on power flow Jacobian determinant[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2096-2108.
- [11] 姜涛, 张明宇, 李雪, 等. 静态电压稳定域局部边界的快速搜索新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4126-4137.
- JIANG Tao, ZHANG Mingyu, LI Xue, et al. A novel algorithm to explore static voltage stability region boundary in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4126-4137.
- [12] 陈昌, 万凯遥, 姜彤. 考虑不确定性的辐射网静态电压稳定极限的二阶锥优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6239-6246.
- CHEN Chang, WAN Kaiyao, JIANG Tong. A conic optimization method for voltage stability assessment of distribution network under uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6239-6246.
- [13] 万凯遥, 姜彤, 冯卓诚, 等. 静态电压稳定分岔点的直接识别算法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6548-6556.
- WAN Kaiyao, JIANG Tong, FENG Zhuocheng, et al. A method of directly identifying the steady-state voltage stability bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6548-6556.
- [14] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604.
- WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604.
- [15] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 改善风电汇集系统静态电压稳定性的无功电压协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1250-1256.
- YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative strategy of reactive power and voltage control for improving static voltage stability of wind power centralized system[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1250-1256.
- [16] 姚尧宙, 付强, 杜文娟, 等. 基于特征值指标的光伏并网系统静态电压稳定性[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 32-41, 140.
- YAO Jingzhou, FU Qiang, DU Wenjuan, et al. Static voltage stability of photovoltaic grid-connected system based on eigenvalue index[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 32-41, 140.
- [17] 杜潇, 周林, 郭珂, 等. 大型光伏电站静态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3427-3434.
- DU Xiao, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Static voltage stability analysis of large-scale photovoltaic plants[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3427-3434.
- [18] 刘运鑫, 姚良忠, 廖思阳, 等. 光伏渗透率对电力系统静态电压稳定性影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5484-5496.
- LIU Yunxin, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Study on the impact of photovoltaic penetration on power system static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5484-5496.
- [19] 齐金山, 姚良忠, 廖思阳, 等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 47-57.
- QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023,

51(5): 47-57.

[20] 辛焕海, 甘德强, 鞠平. 多馈入电力系统广义短路比: 多样化新能源场景[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5516-5526.
XIN Huanhai, GAN Deqiang, JU Ping. Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power electronic devices: analysis for various renewable power generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5516-5526.

[21] 徐式蕴, 周玘玥, 彭龙, 等. 评估新能源多场站送出系统静态电压稳定的裕度比指标研究[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4026-4034.
XU Shiyun, ZHOU Binyue, PENG Long, et al. Study on margin ratio index of static voltage stability of multiple renewable energy stations delivery system[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4026-4034.

[22] VERMA N, KUMAR N, KUMAR B. Battery energy storage-based system damping controller for alleviating sub-synchronous oscillations in a DFIG-based wind power plant[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 524-541.

[23] ZHAO J, HUANG M, ZHA X. Nonlinear analysis of PLL damping characteristics in weak-grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(11): 2752-2756.

[24] 解宝. 电网阻抗影响下大型光伏并网系统稳定性分析及控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
XIE Bao. Stability analysis and control strategies of large-scale photovoltaic grid-connected systems under the influence of grid impedance[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

[25] 张东辉, 陈新, 杨舒婷, 等. 含静止无功补偿装置的光伏电站高频谐振分析及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9580-9594.
ZHANG Donghui, CHEN Xin, YANG Shuting, et al. Analysis of high-frequency resonance and suppression strategy of photovoltaic power plant with static reactive power compensation device[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9580-9594.

[26] 黄志光, 陈浩, 丁浩寅, 等. 计及数字控制延时影响的含 PMSG 电力系统的宽频振荡 z 域阻抗判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 138-146.
HUANG Zhiguang, CHEN Hao, DING Haoyin, et al. The z domain impedance criterion for wide-band oscillation stability analysis of a power system with PMSG considering the impact of digital control delay[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 138-146.

[27] 张冲, 王伟胜, 何国庆, 等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067.
ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067.

收稿日期: 2024-12-18; 修回日期: 2025-03-24

作者简介:

范越(1970—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为大电网规划及安全稳定分析; E-mail: fany@nw.sgcc.com.cn

任冲(1984—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电网运行与控制; E-mail: 119074735@qq.com

王智伟(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调控运行。E-mail: 3523788837@qq.com

(编辑 张颖)