

大规模光伏发电并网系统电压稳定分岔研究

李 升^{1,2}, 卫志农¹, 孙国强¹, 高 鹏², 肖 佳²

(1. 河海大学 能源与电气工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 运用数值分岔软件 MATCONT 对一个接入大规模光伏电站的经典 3 节点系统进行分岔分析。单参数分岔分析结果显示, 系统存在着危害负荷电压稳定性的亚临界 Hopf 分岔。双参数分岔分析结果显示, 当光伏电站以滞后功率因数运行时, 系统具有最大电压稳定域光伏有功出力值, 可作为光伏电站最大安装容量; 而以超前功率因数运行时则会使系统的电压稳定域缩小。当光伏电站以滞后功率因数运行时, 光照强度大幅度突降会对负荷电压稳定性造成不利影响, 光伏电站有功出力越大, 该影响越严重。对系统中的等值发电机角速度施加线性反馈控制后可延迟甚至完全消除亚临界 Hopf 分岔, 从而可使系统以鞍结分岔点作为系统的电压稳定临界点, 大幅扩大了电压稳定域; 采用线性反馈控制措施还可使光照强度发生大幅度突降时负荷电压能够快速恢复。

关键词: 大规模光伏电站; 并网; 电压稳定; 亚临界 Hopf 分岔; 线性反馈控制; 光照强度

中图分类号: TM 615; TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.003

0 引言

近年来光伏发电在国内外均得到了迅猛的发展^[1-3]。截至 2013 年底, 我国光伏发电总装机容量已达到 19.42 GW, 全年累计发电量达 9 TW·h; 2014 年新增光伏发电装机容量为 1060 万千瓦 (10.6 GW), 到 2015 年 6 月, 已提前完成十二五光伏总装机容量达 3500 万千瓦 (35 GW) 的目标。大规模集中式光伏电站 (10 MW 以上) 并网是光伏发电一个重要的发展方向^[4-5], 目前国内兆瓦级较大规模光伏电站的建设和投运已经普及, 也有百兆瓦级以上超大规模光伏电站并网运行 (如青海格尔木 200 MW 荒漠光伏电站)。

由于易受天气等因素影响, 光伏电源有功出力具有随机性、波动性和间歇性的特点, 光伏发电系统并网运行势必会给电网的动态行为及稳定运行造成影响^[6-8], 特别是大规模光伏电站接入对电网电压稳定性带来的影响, 值得深入研究和剖析。目前国内外学术界已开始对光伏并网系统稳定性课题开展研究, 文献[8-10]对不同渗透率的光伏电站并网对系统发生短路故障后暂态稳定性的影响进行了时域仿真分析; 文献[9]研究了不同渗透率光伏电站并网在光照强度发生快速变化时的系统动态响应情况; 文献[11]分析了大规模光伏电站并网对系统静态电压稳定性的影响; 文献[12]则研究了不同时段下晴朗及多云天气对大规模光伏并网系统

电压稳定极限的影响。

文献[13]以一个含光伏电站的简单 3 节点系统为例, 通过建立系统的常微分方程组 (ODE) 模型计算出系统的 $P-U$ 曲线并得到电压稳定临界点 (即鞍结分岔点), 以此判断系统的电压稳定裕度; 并运用灵敏度法考察了光照强度、温度及负荷等参数的小扰动对系统暂态和稳态响应的影响。文献[14]运用连续潮流法求取大规模光伏并网系统的 $P-U$ 曲线, 考察了 3 种不同光伏模型对系统电压稳定性的影响。对于光伏发电及风力发电等这一类间歇性电源并网系统的稳定和控制, 特别适合采用分岔理论开展研究^[15-16], 这是由于通过使分岔参数在某一范围内变化来考察是否有影响系统稳定性的分岔行为, 而不必过多考虑间歇性电源出力的随机性和波动性特征。

本文以常用于研究电压稳定性的经典 3 节点系统为例, 在负荷母线侧接入大规模光伏电站, 运用数值分岔软件研究光伏并网系统的动态行为和分岔现象, 搜索对系统电压稳定存在危害的分岔点, 确定系统的电压稳定域及光伏电站最大安装容量; 在此基础上考察线性反馈控制方法在延迟及消除分岔方面所起的作用, 并分析光照强度发生大幅度突变时对系统电压稳定性的影响。

1 光伏发电并网系统 ODE 模型

图 1 是一个含有光伏电站的经典 3 节点系统模型, 负荷由 Valve 综合负荷模型模拟的感应电动机 (该模型由 Valve 在分析 1983 年瑞典电网崩溃时提出) 和恒功率负荷模型 ($P_1 + jQ_1$) 并联而成, 大规模光伏电站从负荷母线接入系统。3 节点系统模型是分析电压稳定及崩溃问题的一个经典模型^[17-18], 基于该模型开展电压稳定分岔研究可获得一些极具代表性的结论^[19-21]。为简化处理, 本文并不考虑光伏发电系统的

收稿日期: 2014-10-16; 修回日期: 2015-11-25

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (PPZY2015A-031); 南京工程学院科研创新基金面上项目 (CKJB201208); 国家级大学生实践创新训练计划项目 (201311276004Z)

Project supported by the Jiangsu University Brand Specialty Construction Project (PPZY2015A031), the Science Research Innovation Foundation of Nanjing Institute of Technology (CKJB201208) and the National Student's Practice Innovation Training Project of China (201311276004Z)

动态特性,而将其视为相当于吸收负有功功率的恒定功率负荷^[6-7]。

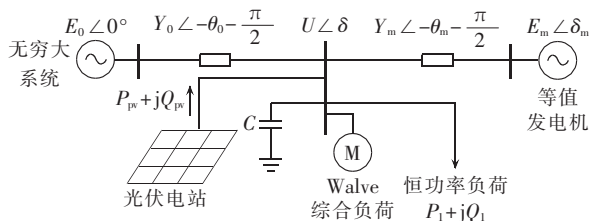


图 1 含大规模光伏电站的 3 节点系统模型

Fig.1 Model of 3-bus system with large-scale PV power plant

在经典 3 节点系统 ODE 的基础上^[19-20],可得图 1 所示光伏发电并网系统的 ODE 方程组:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_m = \omega \\ M\dot{\omega} = -D\omega + P_m + E_m^2 Y_m \sin\theta_m + E_m U Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) \\ k_{q\omega}\dot{\delta} = -k_{qV}U - k_{qV2}U^2 + Q - Q_0 - Q_1 + Q_{pv} \\ Tk_{q\omega}k_{qV}\dot{U} = k_{p\omega}k_{qV2}U^2 + (k_{p\omega}k_{qV} - k_{q\omega}k_{pV})U + k_{p\omega}(Q_0 + Q_1 - Q_{pv} - Q) - k_{q\omega}(P_0 + P_1 - P_{pv} - P) \end{cases} \quad (1)$$

系统参数取值如下:等值发电机,惯量 $M=0.3$ p.u., 阻尼系数 $D=0.05$ p.u., 机械功率 $P_m=1$ p.u., 电势 $E_m=1$ p.u.; 无穷大系统端电压 $E_0=1$ p.u.; 网络部分(导纳模值及角度), $Y_m=5$ p.u., $\theta_m=-0.08722$ rad, $Y_0=20$ p.u., $\theta_0=-0.08722$ rad; 负荷部分, 各负荷系数 $k_{p\omega}=0.4$, $k_{q\omega}=-0.03$, $k_{pV}=0.3$, $k_{qV}=-2.8$, $k_{qV2}=2.1$, 时间系数 $T=8.5$ s, Valve 电动机负荷的恒定功率 $P_0=0.6$ p.u., $Q_0=1.3$ p.u., 恒功率负荷有功功率 $P_1=1.2$ p.u.。线路导纳及功率均为基准容量为 100 MV·A 下的计算值。

P_{pv} 、 Q_{pv} 分别为光伏电站发出的有功功率和无功功率,根据规程规定,通过 10~35 kV 电压等级并网的光伏发电系统功率因数应能在 0.98(超前)至 0.98(滞后)范围内连续可调;有特殊要求时,可做适当调整以稳定电压水平^[22]。现设光伏电站的发电功率因数保持在 0.98(滞后),即 $Q_{pv}=0.2P_{pv}$ 。

2 光伏发电并网系统分岔分析

现运用基于 MATLAB 7.0 开发的数值分岔分析工具箱 MATCONT 对式(1)所示 ODE 系统进行单参数和双参数分岔计算,以获知该系统的分岔行为及其对电压稳定性的影响。

2.1 单参数分岔分析

以负荷母线处恒功率负荷的无功功率 Q_1 为分岔参数进行单参数分岔分析,运用 MATCONT 可得到式(1)所示 ODE 系统的平衡点曲线,如图 2 所示,图中 Q_1 、 U 均为标幺值,后同。其中,曲线 1 为 $P_{pv}=0$,即不投入光伏电站时的 Q_1 - U 曲线;曲线 2 为 $P_{pv}=1$ p.u. 时的 Q_1 - U 曲线。

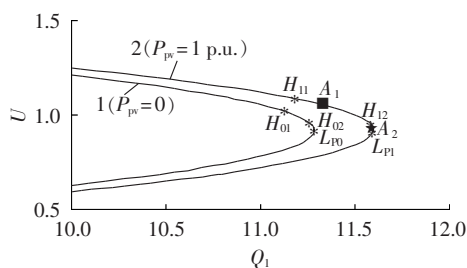


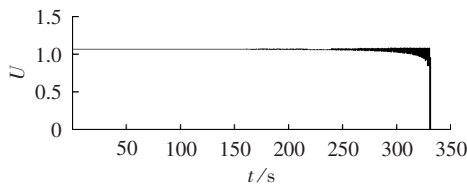
图 2 Q_1 - U 曲线

Fig.2 Q_1 - U curves

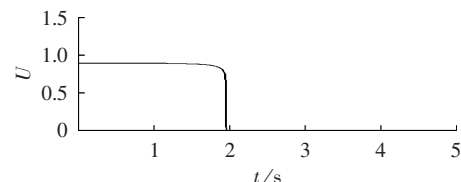
由图 2 可知,2 条曲线均搜索到亚临界 Hopf 分岔(UHB)点 H_{01} 、 H_{11} , 超临界 Hopf 分岔(SHB)点 H_{02} 、 H_{12} , 及鞍结分岔(SNB)点 L_{p0} 、 L_{p1} 。一般将 SNB 点视为系统电压稳定的临界点,当系统运行于该点时,若负荷受到一个微小的扰动甚至不受扰动即会导致负荷电压迅速发生单调崩溃^[23]。在 UHB 点,一个先于分岔存在的不稳定极限环和稳定平衡点相互作用,从而使稳定平衡点变得不稳定,导致产生一个振幅逐渐增大的振荡^[24]。UHB 点对系统的稳定性存在潜在的危害,深入的研究发现 UHB 点也是系统电压稳定的临界点^[25],系统运行于该点时若负荷受到一个微小扰动则负荷电压即会发生增幅振荡并最终崩溃^[26-27]。

图 2 的 Q_1 - U 曲线中,UHB 点与 SHB 点之间的区域为电压不稳定区域。现以投入光伏电站运行的曲线 2 为例,取 H_{11} 和 H_{12} 这 2 个 Hopf 分岔点之间的 A_1 点为系统的当前运行点,图 3(a)为系统运行于 A_1 点且不受任何扰动下的 t - U 曲线,可知负荷电压在维持一段时间的稳定运行后开始发生增幅振荡,约在 330 s 时电压最终崩溃。而曲线 2 上的 H_{12} 点和 L_{p1} 点之间也是电压不稳定区域,图 3(b)为系统运行在该区域中的 A_2 点且不受任何扰动下的 t - U 曲线,可知负荷电压会迅速发生单调崩溃。

综上,为保证负荷母线电压稳定运行,应取 UHB 点为系统的电压稳定临界点。



(a) 系统运行于曲线 2 的 A_1 点



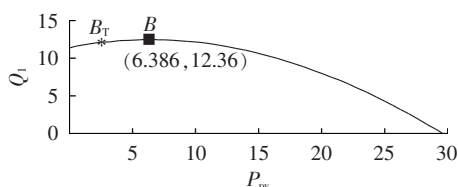
(b) 系统运行于曲线 2 的 A_2 点

图 3 t - U 曲线

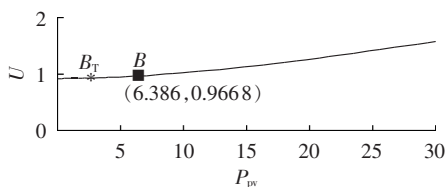
Fig.3 t - U curves

2.2 双参数分岔分析

为了进一步考察投入光伏电站对系统电压稳定域的影响,对式(1)所示的 ODE 模型进行了双参数分岔分析。图 4 和图 5 分别为系统的 SNB 边界曲线和 UHB 边界曲线(分岔边界曲线上的点都是分岔点,图中 P_{pv} 为标么值,下同)。图 4 曲线上的 B_T 点是 Bogdanov-Takens 分岔点(一种余维二分岔点),本文不予考虑。

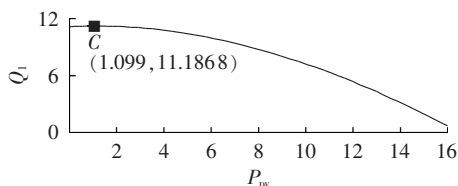


(a) $P_{pv}-Q_1$ 边界曲线

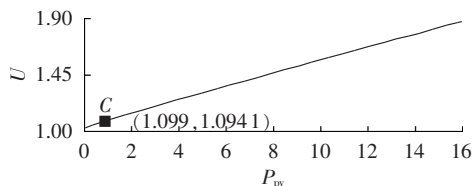


(b) $P_{pv}-U$ 边界曲线

图 4 SNB 边界曲线
Fig.4 SNB boundary curves



(a) $P_{pv}-Q_1$ 边界曲线



(b) $P_{pv}-U$ 边界曲线

图 5 UHB 边界曲线
Fig.5 UHB boundary curves

由图 4(a)可知随着光伏电站有功出力 P_{pv} 从 0 开始逐渐增大,SNB 点处的 Q_1 值也随之增大,即 SNB 被延迟发生,有利于系统的电压稳定性;但当 P_{pv} 增大至 B 点时, Q_1 值开始随着 P_{pv} 的增大而减小,从而不利于系统电压稳定。由图 5(a)可得类似结论,系统的 UHB 点一开始随着 P_{pv} 的增大而增大,到达 C 点后则随着 P_{pv} 的增大而减小,从而不利于系统电压稳定。因此对于光伏电站,并不是发出的有功出力越大越有利于系统的电压稳定性;对于 SNB 和 UHB,都对应存在一个最大电压稳定域光伏有功出力值 P_{pvmax} (B 点或 C 点对应的 P_{pv} 值), P_{pv} 一旦超过相应的

P_{pvmax} ,SNB 点和 UHB 点处的 Q_1 值均会随着 P_{pv} 的增大而减小,从而减小系统的电压稳定域。

另一方面,由图 4(b)、图 5(b)及图 2 可知,系统投入光伏电站运行后, P_{pv} 越大,分岔点处的电压 U 就越高,从而使整个电压稳定区域的平衡点电压均被相应抬高。如果光伏电站有功出力 P_{pv} 过大,则会使负荷电压 U 过高而不合格。

综上,若要尽量使系统具有最大的电压稳定域,并保证负荷电压幅值合格,考虑到 UHB 点是系统的电压稳定临界点,光伏电站最大有功出力应保持在 $P_{pvmaxUHB}$ (1.099 p.u.) 附近为宜。文献[28]按照保证节点电压不越下限的方法来确定光伏电站的最大安装容量,和该方法相比,本文所提出的根据电压稳定域来确定光伏电站最大安装容量更为严格。

3 UHB 分岔控制

由前述分析可知,对图 1 所示含光伏电站系统,由于超前于 SNB 点的 UHB 点的存在,使得系统的电压稳定域大为缩减,同时也抑制了光伏电站可接入系统的发电容量。为延迟或完全消除 UHB,必须采用针对 UHB 的分岔控制措施。

线性状态反馈控制和 Washout-filter 反馈控制在延迟 Hopf 分岔方面具有较大的优势[18]。按照简单实用的原则,现针对等值发电机的角速度 ω 引入线性反馈控制,系统的 ODE 变为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_m = \omega \\ M\dot{\omega} = -D\omega + P_m + E_m^2 Y_m \sin \theta_m + E_m U Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) - MK_s(\omega - 0) \\ k_{q\omega} \dot{\delta} = -k_{qv} U - k_{qv2} U^2 + Q - Q_0 - Q_1 + Q_{pv} \\ Tk_{q\omega} k_{pv} \dot{U} = k_{p\omega} k_{qv2} U^2 + (k_{p\omega} k_{qv} - k_{q\omega} k_{pv}) U + k_{p\omega} (Q_0 + Q_1 - Q_{pv} - Q) - k_{q\omega} (P_0 + P_1 - P_{pv} - P) \end{cases} \quad (2)$$

其中, K_s 为线性反馈控制系数。

应当指出,加入线性反馈控制的式(2)所示 ODE 系统和式(1)所示 ODE 系统相比,在同条件下,无论 K_s 如何变化,均不会改变系统的平衡点曲线位置,同时 SNB 点位置也不会发生变化。

图 6 所示的系统 Hopf 分岔边界曲线是当 $P_{pv} = 1$ p.u. 时,取 K_s 和 Q_1 为参数的双参数分岔分析结果。

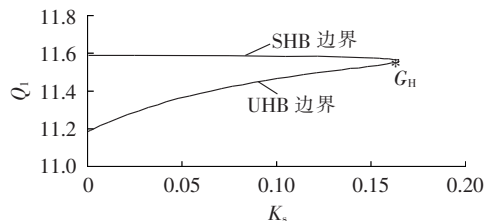


图 6 UHB 和 SHB 边界曲线 ($P_{pv} = 1$ p.u.)

Fig.6 UHB and SHB boundary curves ($P_{pv} = 1$ p.u.)

图 6 中, $K_s=0$ 对应着没有施加线性反馈控制的情况。结合图 2 和图 6 分析可知,随着 K_s 从 0 开始逐渐增大,系统 Q_1-U 平衡点曲线上半支会出现 2 个 Hopf 分岔点,其中一个是 UHB 点,另一个是 SHB 点;且随着 K_s 的增大,UHB 延迟、SHB 提前发生。 G_H 点是 UHB 和 SHB 的分界点,当 K_s 增大至 G_H 点对应值(0.164)时,UHB 点消失, Q_1-U 曲线上半支出现 2 个 SHB 点。当 K_s 增大至曲线拐点对应值(0.16422)时,2 个 SHB 点重合。

由上述分析,系统引入对发电机角速度 ω 的线性反馈控制后,随着 K_s 的逐渐增大,UHB 逐渐延迟,从而扩大了系统的电压稳定区域。特别是当 K_s 超过 Hopf 分岔边界曲线的拐点对应值时,Hopf 分岔完全消除,系统将以 SNB 点作为电压稳定的临界点,从而有效扩大了系统的电压稳定域。

4 光照强度突降对系统电压稳定性的影响

光伏电站有功出力 P_{pv} 受限于光照强度和环境温度,若环境温度不变,光照强度突降,则会导致 P_{pv} 快速减小,从而对系统负荷母线的电压稳定性产生影响。

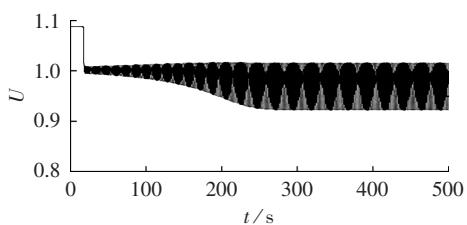
对图 1 所示系统,在 UHB 点,若负荷 Q_1 发生一个微小的正向扰动,则会使负荷母线电压发生增幅振荡并快速崩溃。现假设 Q_1 维持不变,考察在 UHB 点光伏电站有功出力的突然减小对电压稳定性的影响。

4.1 未施加线性反馈控制

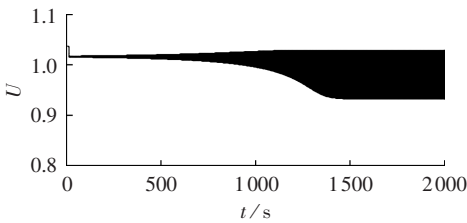
设接入的光伏电站为超大规模容量级别,取 $P_{pv}=1\text{ p.u.}$,即 100 MW。系统运行在亚临界 Hopf 分岔点(即图 2 中曲线 2 的 H_{11} 点,该点 $Q_1=11.186614\text{ p.u.}$)。现考虑一种风云突变的极端情况,在时间 $t=20\text{ s}$ 时光照强度突降致使 P_{pv} 瞬间减至 0,时域仿真结果如图 7(a) 所示,可知当 P_{pv} 突降时负荷母线电压跌落并快速发生增幅振荡,并在约 260 s 时趋于等幅振荡,因振幅较大,此时可认为电压失去稳定。

经过多次仿真测试表明,当 P_{pv} 突降程度较小时(如降至 0.8 p.u.),负荷电压 U 仅会发生振幅非常微小的等幅振荡,不影响系统的电压稳定性;若 P_{pv} 突降程度较大, U 则会出现图 7(a) 所示的变化特征。表 1 给出 P_{pv} 突降程度较大时的相关测试数据,表中 P_{pv} 、电压为标幺值。可知 P_{pv} 突降的程度越大, U 经历增幅振荡进入大幅度等幅振荡的时间就越短,越不利于电压稳定。以 P_{pv} 从 1 p.u. 突降至 0.2 p.u. 为例,仅经过 6 min 负荷电压即进入大幅度振荡。

系统若运行在图 2 曲线 2 上 H_{11} 点之前的电压稳定域中的某些平衡点,当 P_{pv} 突降时也存在类似结论。考虑到天气变恶劣后很可能会在相对较长一段时间内得以保持,因此光照强度突降对大规模光伏电



(a) P_{pv} 从 1 p.u. 突降至 0



(b) P_{pv} 从 0.2 p.u. 突降至 0

图 7 光照强度突降后 $t-U$ 变化曲线

Fig.7 $t-U$ curve when irradiance intensity drops suddenly

表 1 P_{pv} 突降时的仿真测试数据(P_{pv} 初始值为 1 p.u.)
Table 1 Simulative data when P_{pv} drops suddenly (initial P_{pv} is 1 p.u.)

P_{pv}	进入大幅度振荡时间/s	等幅振荡时的最大/最小电压
0.5	1 100	1.064/0.868 6
0.4	720	1.056/0.881 7
0.3	500	1.048/0.889 9
0.2	360	1.039/0.899 4
0.1	300	1.028/0.909 6
0	240	1.017/0.922 4

站并网系统电压稳定性的不利影响值得引起重视。

若设接入的光伏电站为较大规模容量级别,取 $P_{pv}=0.2\text{ p.u.}$,即 20 MW。系统运行在相应的亚临界 Hopf 分岔点(该点 $Q_1=11.1494924\text{ p.u.}$)。当 $t=20\text{ s}$ 时 P_{pv} 突降至 0,时域仿真结果如图 7(b) 所示,可知此时曲线的变化规律总体上仍同图 7(a),但负荷电压进入最终等幅振荡的时间要长得多,约为 1400 s(23 min),因此当接入系统的光伏电站有功出力为较大规模级别时,光照强度的突降对系统电压稳定性的影响要小于超大规模光伏电站。

4.2 施加线性反馈控制后

现对发电机角速度 ω 施加线性反馈控制, K_s 取 0.165,略超过图 6 所示 Hopf 分岔边界曲线拐点的数值,此时系统的 Hopf 分岔完全消除。图 8 为系统运行于图 2 中曲线 2 的 H_{11} 点位置,当光照强度突降为 0(P_{pv} 从 1 p.u. 瞬间减至 0)时的 $t-U$ 变化曲线。由图 8 可知,施加线性反馈控制后,负荷电压在扰动发生后经过短暂的减幅振荡便迅速恢复稳定。

5 光伏电站以超前功率因数运行对电压稳定性的影响

上述研究均是在光伏电站以滞后功率因数运行

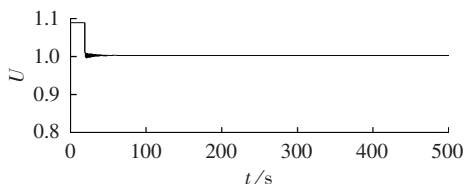
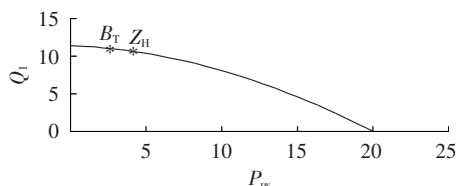


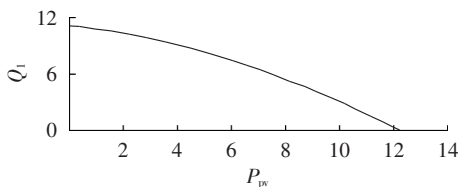
图 8 光照强度突降后 $t-U$ 变化曲线
(施加线性反馈控制系数 $K_s=0.165$)

Fig.8 $t-U$ curve when irradiance intensity drops suddenly (coefficient of linear feedback control $K_s=0.165$)

的基础上进行的。现假设光伏电站的发电功率因数为 -0.98 (即超前运行,发出有功功率、吸收无功功率),以观测该情况下系统的电压稳定性。图 9 为光伏电站在超前功率因数运行下,未施加线性反馈控制时的分岔边界曲线,其中 Z_H 点是另一种余维二分岔——零 Hopf 分岔点,不予考虑。由图 9 可知随着光伏电站有功出力 P_{pv} 的逐渐增大,SNB 和 UHB 点处的 Q_1 值均逐渐减小,即系统投入光伏电站运行只会导致系统的电压稳定域减小。因此从维持系统电压稳定性的角度出发,应尽量避免光伏电站以超前功率因数运行。对系统施加线性反馈控制后,同样可有效延迟或完全消除 Hopf 分岔,此处不再赘述。



(a) SNB 边界曲线



(b) UHB 边界曲线

图 9 光伏电站超前运行时的分岔边界曲线

Fig.9 Bifurcation boundary curves when PV power plant operates with leading power factor

6 结论

本文以一个从负荷母线接入大规模光伏电站的经典 3 节点系统为例,运用 MATCONT 软件分析了系统分岔行为及光伏电站投运对电压稳定性的影响,并分析了线性反馈分岔控制措施的应用效果,可得以下结论。

a. 光伏电站投入运行后,系统仍存在 Hopf 分岔现象(包括 UHB 和 SHB),应对负荷电压稳定产生危害的 UHB 点作为系统的电压稳定临界点。

b. 当光伏电站以滞后功率因数运行时,UHB 和

SNB 均对应存在一个最大电压稳定域光伏有功出力值,当光伏有功出力 P_{pv} 小于该值时,系统的电压稳定域随着 P_{pv} 的增大而增大; P_{pv} 一旦超过该值,系统的电压稳定域会随着 P_{pv} 的增大而减小。而当光伏电站以超前功率因数运行时,系统的电压稳定域随着 P_{pv} 的增大而减小,这种运行情况应尽量避免。接入电网的光伏电站最大发电安装容量可根据最大电压稳定域光伏有功出力值确定。

c. 对等值发电机角速度 ω 施加线性反馈控制,可有效延迟 Hopf 分岔的发生;通过选择适当的控制系数 K_s ,即可完全消除 Hopf 分岔现象,从而使系统的电压稳定临界点从 UHB 点变为 SNB 点,有效扩大了系统的电压稳定域,同时也增大了光伏电站的最大安装容量。

d. 当光伏电站以滞后功率因数运行时,光照强度突降会导致负荷电压发生大幅度的振荡从而失去稳定。若光照强度发生较大程度的突然降落,对于超大规模发电容量的光伏电站,负荷电压会快速(数分钟)进入大幅度的等幅振荡;而对较大规模容量光伏电站,则会在数十分钟后进入大幅度振荡。即光伏电站发电容量越大,光照强度突降越容易造成系统电压振荡失稳。当系统施加线性反馈控制后,选取适当的控制系数可使光照强度突降后负荷电压能够快速恢复稳定。

参考文献:

- [1] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-33,39.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-33, 39.
- [2] BALATHANDAYUTHAPANI S, EDRINGTON C S, HENRY S D. Analysis and control of a photovoltaic system-application to a high-penetration case study[J]. IEEE System Journal, 2012, 6(2): 213-219.
- [3] 周俊,丁剑,王青,等. 光伏接入对玉树电网安全稳定影响及控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):25-29,43.
ZHOU Jun, DING Jian, WANG Qing, et al. Impact of PV integration on safety and stability of Yushu Grid and control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 25-29, 43.
- [4] 周林,张密. 大型光伏电站谐振现象分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 8-14.
ZHOU Lin, ZHANG Mi. Analysis of resonance phenomenon in large-scale photovoltaic power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 8-14.
- [5] 瞿继平,吴兴全,闫凯,等. 光伏电站弱电源特性对送出线路继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 146-151.
QU Jiping, WU Xingquan, YAN Kai, et al. Influence of PV station weak power feature on relay protection of outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 146-151.
- [6] 陈权,李令冬,王群京,等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配

- 电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
- CHEN Quan, LI Lingdong, WANG Qunjing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [7] 杨卫东, 薛峰, 徐泰山, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响及相关需求分析[J]. 水电自动化与大坝监测, 2009, 33(4): 35-39, 43.
- YANG Weidong, XUE Feng, XU Taishan, et al. Grid-connected photovoltaic's influence on power systems and some related issues[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2009, 33(4): 35-39, 43.
- [8] SARA E, VIJAY V, GERALD T, et al. Impact on increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [9] YUN T T, KIRSCHEN D S. Impact on the power system of a large penetration of photovoltaic generation [C] // 2007 Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [10] YAGAMI M, ISHIKAWA S, ICHINOHE Y, et al. Transient stability assessment of synchronous generator in power system with high-penetration photovoltaics [C] // 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Busan, Korea: IEEE, 2013: 401-404.
- [11] KABIR S, NADARAJAH M, BANSAL R. Impact of large scale photovoltaic system on static voltage stability in sub-transmission network [C] // 2013 ECCE Asia Downunder (ECCE Asia). Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2013: 468-473.
- [12] ALY M M, ABDEL-AKHER M, ZIADI Z. Voltage stability assessment of photovoltaic energy systems with voltage control capabilities [C] // 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Nagasaki, Japan: IEEE, 2012: 1-6.
- [13] XUE Yaosuo, MANJREKAR M, LIN Chenxi, et al. Voltage stability and sensitivity analysis of grid-connected photovoltaic system [C] // 2011 Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2011: 5417-5423.
- [14] ALY M, EID A, ABDEL-AKHER M. Advanced modeling of photovoltaic energy systems for accurate voltage stability assessment of distribution systems [J]. Advanced Science Letters, 2013, 19(5): 1353-1357.
- [15] 杨黎晖, 马奎奎. 基于分岔理论的含双馈风电机组的电力系统电压稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 1-8.
- YANG Lihui, MA Xikui. Analysis on voltage stability of power system with doubly fed induction generator wind turbine based on bifurcation theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 1-8.
- [16] 马幼捷, 刘进华, 周雪松, 等. 含 STATCOM 的风电系统鞍结分岔边界追踪及其非线性解析表达[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 90-93, 98.
- MA Youjie, LIU Jinhua, ZHOU Xuesong, et al. Tracking and nonlinear analytical expression of saddle node bifurcation boundary in wind power system with STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 90-93, 98.
- [17] DOBSON I, LU L. New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 905-913.
- [18] CHIANG H D, JEAN-JUMEAU R. Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 584-592.
- [19] JING Zhujun, XU Dashun, CHANG Yu, et al. Bifurcations, chaos, and system collapse in a three node power system [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(6): 443-461.
- [20] RAJESH K G, PADIYAR K R. Analysis and bifurcations in a power system model with excitation limits [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2001, 11(9): 2509-2516.
- [21] 彭志炜. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 73-80.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站无功补偿技术规范: GB/T29321—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [23] KOBRAVI K, KINSNER W, FILIZADEH S. Analysis of bifurcation and stability in a simple power system using MATCONT [C] // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2007: 1150-1154.
- [24] van CUTSEM T, VOURNAS C. 电力系统电压稳定性 [M]. 王奔, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 109.
- [25] 王宝华, 杨成梧, 张强. 电力系统分岔与混沌研究综述 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 1-10.
- WANG Baohua, YANG Chengwu, ZHANG Qiang. Summary of bifurcation and chaos in electric power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 1-10.
- [26] 李升, 蔡克红, 丁理. 电力系统 Hopf 分岔反馈控制仿真研究 [J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1646-1650.
- LI Sheng, CAI Kehong, DING Li. Simulation research on Hopf bifurcation feedback control in power systems [J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1646-1650.
- [27] GU Wei, MILANO F, JIANG Ping, et al. Hopf bifurcations induced by SVC controllers: a didactic example [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(3/4): 234-240.
- [28] 王一波, 李晶, 许洪华. 考虑电网安全稳定约束的光伏电站最大安装容量计算与分析 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(8): 971-975.
- WANG Yibo, LI Jing, XU Honghua. Analysis of the maximum installed capacity of PV station constrained by power system security and stability [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008, 29(8): 971-975.

作者简介:



李升

李升(1973—),男,江苏仪征人,副教授,博士研究生,主要研究方向为大电网及新能源并网系统电压稳定及控制(E-mail: lisheng_njit@126.com);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统分析、运行与控制研究;

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,主要从事电力系统运行与控制研究。

Voltage stability bifurcation of large-scale grid-connected PV system

LI Sheng^{1,2},WEI Zhinong¹,SUN Guoqiang¹,GAO Peng²,XIAO Jia²

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;

2. School of Electric Power Engineering,Nanjing Institute of Technology,Nanjing 211167,China)

Abstract: The numerical bifurcation software MATCONT is applied in the parameter bifurcation analysis for classic 3-bus system with large-scale PV(PhotoVoltaic) power plant. The results of single-parameter bifurcation analysis show that,system has an unstable Hopf bifurcation,harmful to the load voltage stability. The results of double-parameter bifurcation analysis show that,when PV power plant operates with lagging power factor, system has PV active power output with the maximum voltage stability domain,which can be taken as the maximum PV installation capacity;when PV power plant operates with leading power factor,the system voltage stability domain becomes narrow. The sudden drop of irradiance intensity may bring adverse effect on the load voltage stability when PV power plant operates with lagging power factor;the more active power the PV power plant outputs,the more serious effect it brings. The linear feedback control of system equivalent generator angle velocity may delay and even totally eliminate the unstable Hopf bifurcation,which allows system to take the saddle-node bifurcation point as the critical point of voltage stability for the great expansion of its voltage stability domain,and also helps the quick recovery of load voltage when the irradiance intensity drops suddenly.

Key words: large-scale photovoltaic power plant; grid-connection; voltage stability; unstable Hopf bifurcation; linear feedback control; irradiance intensity

(上接第 5 页 continued from page 5)

209-212.

[15] 徐玉琴,张丽,王增平,等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010,25(4):135-141.

XU Yuqin,ZHANG Li,WANG Zengping,et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(4):135-141.

[16] CIVANLAR S,GRAINGER J J,YIN H,et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1988,3(3):1217-1223.

作者简介:



王增平

王增平(1964—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究;

姚玉海(1986—),男,河北邯郸人,博士,研究方向为电力系统自愈控制技术;

张首魁(1994—),男,安徽亳州人,硕士生,研究方向为配电网大规模故障恢复;

郭昆亚(1967—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统及其自动化。

Online outage risk assessment based on *k*-th shortest path algorithm

WANG Zengping¹,YAO Yuhai¹,ZHANG Shoukui¹,GUO Kunya²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University,Beijing 102206,China;2. Industrial Automation of Shenyang

Power Supply Company of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co.,Ltd.,Shenyang 110811,China)

Abstract: The accuracy of traditional load assessment method depends on the scale of fault assumption and the computation amount for the corresponding load transfer is too large to meet the speed of online assessment,aiming at which,the concepts relative to online outage risk assessment are defined and explained in detail and an improved *k*-th shortest path algorithm is proposed to obtain all the power-supply paths without loop. It carries out the security verification to further obtain the available power-supply paths for calculating the power outage probability and power outage risk. Case study shows the proposed algorithm can assess the power outage risk accurately,comprehensively and effectively.

Key words: electric power distribution; electric loads; outage probability; outages; risk assessment; *k*-th shortest path algorithm