

# 大型光伏电站接入多机系统暂态电压稳定性研究

李 升<sup>1,2</sup>, 卫志农<sup>1</sup>, 孙国强<sup>1</sup>, 汪子琦<sup>2</sup>

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

**摘 要:** 以一个集中式光伏电站接入 IEEE 14 节点系统为例, 运用时域仿真法对含大规模光伏多机电力系统的暂态电压稳定性进行详细分析。除感应电动机外, 光伏逆变器的动态特性以及光伏电站的运行模式也是影响系统暂态电压稳定性的重要因素。在系统负荷较轻时发生短路故障或系统发生断线故障时, 较小的光伏逆变器响应时间常数有利于系统恢复暂态电压稳定; 系统重载时光伏采用 PV 模式比 PQ 模式更有利于维持暂态电压稳定性。当光伏采用 PQ 模式运行, 若系统重载, 则会使短路故障极限切除时间大大减小, 而在较大的光伏有功出力下断线故障易造成电压崩溃现象。安装动态无功补偿装置 STATCOM 可有效提高含光伏多机系统在重载时的暂态电压稳定性。

**关键词:** 光伏发电; 故障; 电压崩溃; 暂态电压稳定; 逆变器特性

**中图分类号:** TM615; TM712

**文献标识码:** A

## 0 引 言

目前光伏发电已成为一种最主要的新能源开发方式, 大规模集中式接入电网实现异地消纳电能则是光伏发电发展的主要方向之一<sup>[1]</sup>, 目前我国西部地区已规划建设多个千万千瓦级超大规模光伏电站基地。由于光伏发电具有波动性、间歇性及有功出力阶跃性、无转动惯量等特点, 大规模光伏电站并网势必会给电网的安全稳定运行造成影响<sup>[2-4]</sup>; 光伏发电系统所使用的电力电子装置也易引起电网发生失稳和振荡现象。

电力系统时刻承受着各类扰动, 因此在实际运行中并不存在性能完美的稳定性, 为提高电网的电压稳定性, 必须要考虑到动态(暂态)稳定性的影响。目前电力学术界对光伏发电并网系统的暂态和动态电压稳定性已开展了一些研究和应用<sup>[5-9]</sup>, 但对光伏动态特性对系统暂态电压稳定性的影响探讨较少。

对于有限容量的多机系统(如 IEEE 14 节点系统), 当大型集中式光伏电站接入时, 各类大扰动势必会对系统的暂态电压稳定性产生较大的影响, 很

可能会造成电压失稳或电压崩溃。本文以 IEEE 14 节点系统为例, 运用时域仿真法分别研究系统发生断线和短路故障时的系统暂态电压稳定性, 着重考察光伏动态特性的影响并探讨提高系统暂态电压稳定性的有效措施。

## 1 光伏电站及接入系统模型

如图 1 所示, 现将一个安装容量为 100 MW 的大规模集中式光伏电站通过线路接入 IEEE 14 节点系统。考虑光伏接入对系统暂态电压稳定性可能存在不利影响, 为寻找系统中合适的光伏接入点, 可运用  $U-Q$ (电压-无功功率)灵敏度分析法<sup>[10]</sup>计算出 IEEE 14 节点系统各负荷母线的灵敏度指标值, 指标值越大则相应母线的电压稳定性越弱、越小则电压稳定性越强。现运用电力网络规划软件 NEPLAN 提供的  $U-Q$  灵敏度计算程序对 IEEE 14 节点系统的各负荷母线灵敏度进行计算, 其中母线 5 的灵敏度值最小(0.0427 pu/Mvar), 为电压稳定最坚强母线; 而母线 14 灵敏度值最大(0.2227 pu/Mvar), 为电压稳定最薄弱母线, 因此本算例将光伏电站接入母线 5, 如图 1 所示。

收稿日期: 2017-08-31

基金项目: 教育部产学研合作协同育人项目(201602013005); 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金(XTCX201613); 南京工程学院科研创新基金面上项目(CKJB201208)

通信作者: 李 升(1973—), 男, 博士研究生、教授, 主要从事新能源并网系统电压稳定及控制方面的研究。lisheng\_njit@126.com

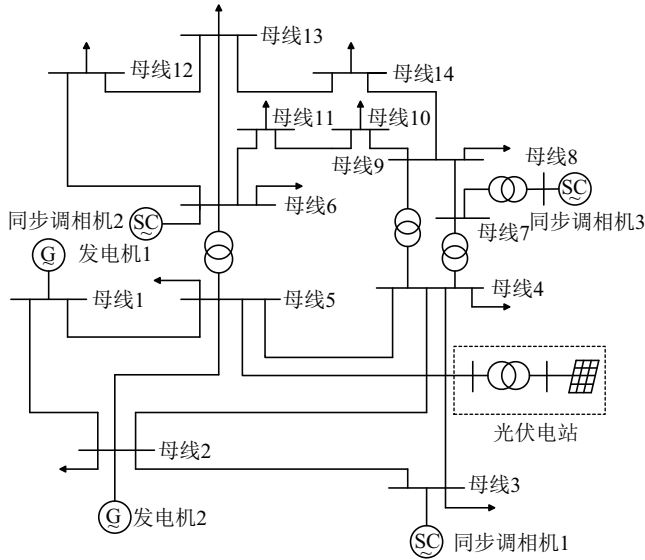


图1 大型光伏电站接入 IEEE 14 节点系统模型

Fig. 1 Model of IEEE 14-bus system containing large-scale PV power plant

运用电力系统分析工具箱 PSAT 2.1.9 建立图 1 所示系统仿真模型。光伏电源模块采用集群等值模型,包括光伏阵列、光伏逆变器及其调节器/控制器;光伏逆变器特性采用 1 阶传递函数描述,能体现和暂态稳定性相关的主要动态特性,如图 2 所示<sup>[11]</sup>。

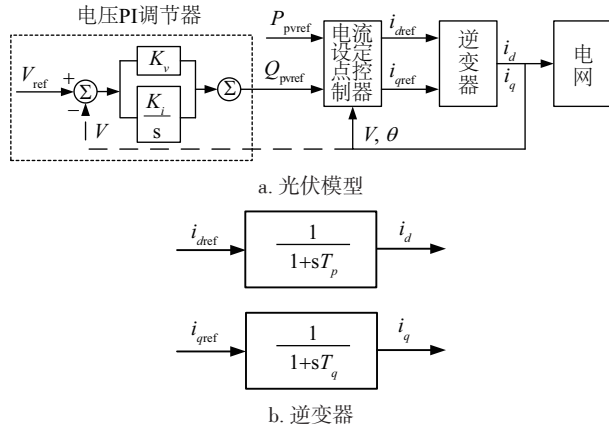


图2 光伏模型及逆变器控制框图

Fig. 2 Block diagrams of PV model and inverter control

光伏电源有 2 种运行模式。一种是 PQ 模式(恒功率因数模式),即维持光伏有功出力  $P$  和无功出力  $Q$  恒定的控制模式,如图 2a 中去除虚框部分所示。一种是 PV 模式,即维持有功出力  $P$  和端口电压  $V$  恒定的控制模式,如图 2a 包括虚框部分所示;PV 模式依据光伏端口电压与电压参考值的变化量采用 PI 调节器实现无功调节。图 2 中  $i_d$ 、 $i_q$

分别为光伏逆变器输出电流的  $d$  轴、 $q$  轴分量;  $T_p$ 、 $T_q$  为光伏逆变器响应时间常数;  $K_v$ 、 $K_i$  为电压 PI 调节器增益;  $V$ 、 $\theta$  分别为光伏端口母线的电压幅值和相角。

图 2a 中电流设定控制器的特性方程为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{pvref} \\ Q_{pvref} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  ——  $i_d$ 、 $i_q$  的参考值;  $V_d$ 、 $V_q$  ——电压  $V$  的  $d$  轴、 $q$  轴分量;  $P_{pvref}$ 、 $Q_{pvref}$  ——光伏逆变器输出的有功功率  $P_{pv}$ 、无功功率  $Q_{pv}$  的参考值(可事先设定)。

由式(1)和图 2b 可推导出:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{T_p} \left[ \frac{1}{V} (Q_{pvref} \cos \theta - P_{pvref} \sin \theta) - i_d \right] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{T_q} \left[ \frac{1}{V} (P_{pvref} \cos \theta + Q_{pvref} \sin \theta) - i_q \right] \end{cases} \quad (2)$$

光伏电站取 PQ 模式时,应将其端口母线设置为发电型 PQ 节点,本算例设置  $Q_{pv} = 0.2P_{pv}$  (即光伏发电功率因数为 0.98);取 PV 模式时,应将其端口母线设置为发电型 PV 节点,本算例将光伏端口母线电压参考值设置为 1.045 pu。

感应电动机动态特性是导致系统电压崩溃的主要原因,因此本算例中的负荷全部采用感应电动机,所有电动机额定视在功率之和为 2.59 pu (初始功率),采用标么制计算时基准容量取 100 MVA。电动机采用 3 阶等值模型(单笼模型),其动态特性方程为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = \omega_0 s E'_q - \frac{1}{T'_0} E'_d - \frac{X - X'}{T'_0} i_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\omega_0 s E'_d - \frac{1}{T'_0} E'_q + \frac{X - X'}{T'_0} i_d \\ \frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $E'_d$ 、 $E'_q$  ——暂态阻抗后电势  $E'$  在  $d$  轴和  $q$  轴的分量;  $\omega_0$  ——电力系统角频率;  $s$  ——电动机转差;  $X$  和  $X'$  ——转子开路电抗和转子堵转短路电抗;  $T'_0$  ——暂态开路时间常数;  $T_m$  ——机械转矩;  $T_e$  ——电磁转矩;  $H$  ——惯量常数。

## 2 断线故障时的暂态电压稳定性

### 2.1 光伏动态特性对暂态电压稳定性的影响

设光伏电站取 PQ 模式,发生断线故障时光伏

有功出力  $P_{pv}=1$  pu (满发功率), 设置扰动条件为时间  $t=5$  s 时母线 2 至母线 4 之间的线路发生断线。

图 3 为母线 14 的电压幅值和所接感应电动机转差的时域仿真结果 (母线 14 是电压稳定最薄弱节点, 因此以其为例进行考察)。

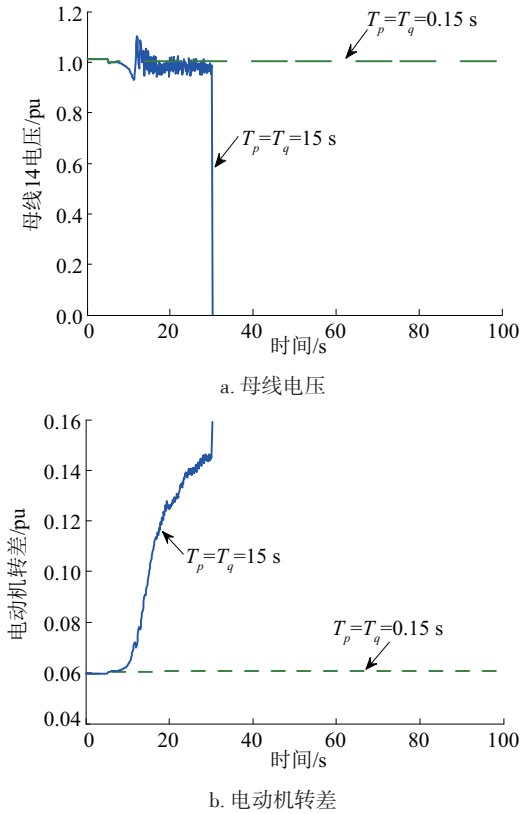


图 3 电压和转差变化曲线 (光伏采用 PQ 模式)

Fig. 3 Voltage and slip curves with PV plant in PQ mode

由图 3a 可知当光伏逆变器响应时间常数  $T_p = T_q = 15$  s 时, 断线后母线电压经过一段时间的振荡后发生崩溃, 其主要原因是断线故障造成各电动机端电压下降, 导致电磁转矩  $T_e$  小于机械转矩  $T_m$ , 转差  $s$  迅速增大 (见式 (3) 和图 3b 所示), 电动机发生制动并发展为堵转现象, 从系统吸收大量的无功功率, 最终造成系统电压崩溃。

现令  $T_p = T_q = 0.15$  s, 由图 3 可知断线后母线 14 电压能够快速恢复至稳定状态 (从 1.014 pu 变为 1.002 pu), 电动机转差  $s$  快速稳定在一个新的值 (从 0.0591 pu 变为 0.0613 pu), 可见光伏逆变器响应时间常数较小时有利于提高系统的暂态电压稳定性。由式 (2) 可知, 当光伏逆变器响应时间常数  $T_p$ 、 $T_q$  较小时, 扰动发生后光伏输出电流  $i_d$ 、 $i_q$  过渡到

稳态的响应速度加快, 能快速恢复光伏注入系统的功率, 从而使电动机端电压快速过渡到新的稳定值 (如图 3a 所示), 并迅速恢复  $T_e = T_m$ , 避免了电动机堵转。

当光伏采用 PV 模式时, 设置电压调节器增益  $K_v=0.1$ 、 $K_i=50$  (以下同), 断线时的时域仿真结果和图 3 相似, 光伏逆变器  $T_p = T_q = 15$  s 时母线电压崩溃,  $T_p = T_q = 0.15$  s 时母线电压快速恢复稳定。

## 2.2 负荷水平和光伏出力波动性对暂态电压稳定性的影响

现进一步考察负荷水平对暂态电压稳定性的影响。光伏采用 PQ 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s, 断线发生时  $P_{pv} = 1$  pu (扰动条件同前), 当系统负荷为初始功率的 1.0~1.5 倍时 (采用全网负荷同时增长模式), 断线后各母线电压均能够得到恢复; 但从 1.6 倍开始 (重载), 不能够维持暂态电压稳定, 如图 4 所示, 扰动发生后电压在经过一段时间的振荡后最终崩溃。由图 4 还可知, 系统重载下负荷倍数越大, 越不利于系统维持暂态电压稳定性 (电压崩溃速度越快)。

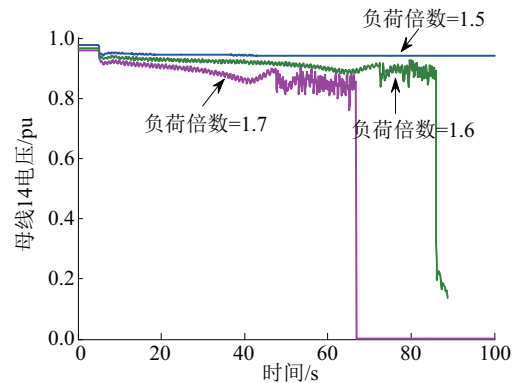


图 4 不同负荷倍数下的电压变化曲线  
(光伏采用 PQ 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s,  $P_{pv} = 1$  pu)

Fig. 4 Voltage curves with PV plant in PQ mode at different load multiples ( $T_p = T_q = 0.15$  s,  $P_{pv} = 1$  pu)

光伏有功出力  $P_{pv}$  具有随机波动性, 在白昼不同时段  $P_{pv}$  值也不同。若系统重载, 经测试, 扰动前  $P_{pv}$  值较大时, 对系统的暂态电压稳定性非常不利。例如当负荷倍数为 1.6、 $T_p = T_q = 0.15$  s 时, 若断线时  $P_{pv} = 0.6 \sim 1.0$  pu, 则母线电压极易发生崩溃; 而断线时  $P_{pv} \leq 0.5$  pu, 电压能恢复稳定。

若令  $T_p = T_q = 0.015$  s, 图 5 为系统负荷倍数为

1.6 和 1.7 时发生断线故障时的电压变化曲线, 和图 4 对比, 此时系统能维持暂态电压稳定性(母线电压发生振荡但振幅远小于 10%, 可认为电压稳定)。

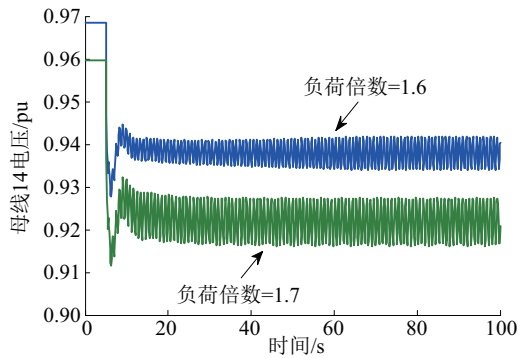


图5 不同负荷倍数下的电压变化曲线  
(光伏采用 PQ 模式,  $T_p = T_q = 0.015$  s,  $P_{pv} = 1$  pu)

Fig. 5 Voltage curves with PV plant in PQ mode at different load multiples ( $T_p = T_q = 0.015$  s,  $P_{pv} = 1$  pu)

当光伏取 PV 模式时, 由于按参考电压采用 PI 调节器调节输出无功, 因此对系统电压有一定支撑作用。图 6 为  $T_p = T_q = 0.15$  s, 断线时的电压变化曲线, 和图 4 对比, 负荷倍数为 1.6 和 1.7 时母线电压均恢复稳定, 可见系统重载时光伏采用 PV 模式更有利于维持暂态电压稳定性。

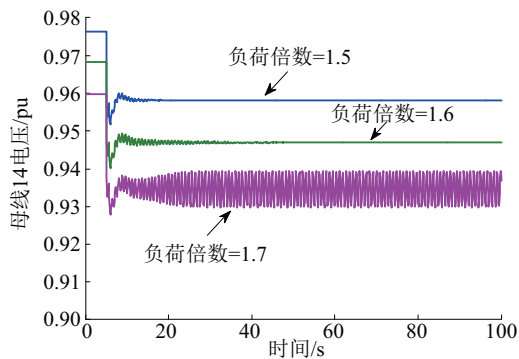


图6 不同负荷倍数下的电压变化曲线  
(光伏采用 PV 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s,  $P_{pv} = 1$  pu)

Fig. 6 Voltage curves with PV plant in PV mode at different load multiples ( $T_p = T_q = 0.15$  s,  $P_{pv} = 1$  pu)

### 2.3 无功补偿对暂态电压稳定性的影响

现于母线 14 处分别安装并联电容器组 C、静止无功补偿器 SVC 及静止同步补偿器 STATCOM (额定容量均取 50 Mvar)。SVC 和 STATCOM 的增益均取 50、时间常数均取 0.1 s (以下同)。负荷倍数为

1.6, 光伏取 PQ 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s, 断线时的电压变化曲线如图 7 所示, 和图 4 比较可知 3 种无功补偿均能有效提高暂态电压稳定性。静止电容器组 C 能提高母线电压, 但电压振荡幅度相对较大; 而采用 SVC 时的母线电压振荡幅度较小, 因此可认为 SVC 补偿效果稍优于 STATCOM。

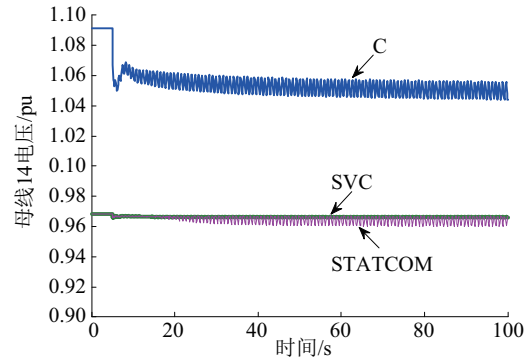


图7 不同无功补偿下的电压变化曲线

(光伏采用 PQ 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s,  $P_{pv} = 1$  pu, 负荷倍数为 1.6)

Fig. 7 Voltage curves with PV plant in PQ mode with different reactive power compensations

( $T_p = T_q = 0.15$  s,  $P_{pv} = 1$  pu and load multiple is 1.6)

## 3 短路故障时的暂态电压稳定性

### 3.1 故障极限切除时间及光伏动态特性对暂态电压稳定性的影响

发生短路故障时, 故障切除时间  $t_c$  (包括继电保护动作时间和断路器跳闸时间) 越大越不利于系统的暂态电压稳定性, 一般存在一个故障极限切除时间 ( $t_{cct}$ ), 其对应短路故障切除后电动机机械转矩和电磁转矩特性曲线交点 (较大值) 处的转差<sup>[13]</sup>,  $t_{cct}$  越大系统暂态电压稳定性越好。

对图 1 所示系统, 设系统负荷倍数为 1.0, 光伏电站采用 PQ 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s, 短路发生时  $P_{pv} = 1$  pu, 设置扰动条件为  $t = 5$  s 时母线 14 所接 13.8/0.4 kV 变电站低压侧母线 (通过扩展配电部分接线实现) 发生三相短路故障, 经过一段时间 (即故障切除时间) 后故障被继电保护切除、断路器跳开母线 14 所供负荷。图 8 为时域仿真结果, 可知故障切除时间  $t_c = 2.20$  s 时母线电压能够恢复稳定, 而  $t_c = 2.21$  s 切除故障时母线电压发生崩溃, 因此可确定故障极限切除时间  $t_{cct} = 2.20$  s。



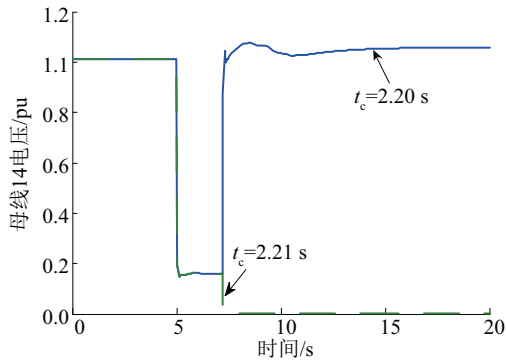


图8 电压变化曲线

(光伏采用PQ模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s,  $P_{pv} = 1$  pu, 负荷倍数为1.0)

Fig. 8 Voltage curves with PV plant in PQ mode

( $T_p = T_q = 0.15$  s,  $P_{pv} = 1$  pu and load multiple is 1.0)

光伏逆变器响应时间常数对  $t_{cct}$  也存在影响, 设  $T_p = T_q = 15$  s, 则  $t_{cct} = 1.65$  s  $< 2.20$  s; 设  $T_p = T_q = 0.015$  s, 则  $t_{cct} = 2.28$  s  $> 2.20$  s。可知系统负荷水平较轻时较小的响应时间常数有利于系统的暂态电压稳定性。

若将光伏 PQ 模式换成 PV 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s, 则  $t_{cct} = 1.95$  s  $< 2.20$  s, 系统负荷水平较轻时光伏采用 PV 模式反而会在一定程度上降低暂态电压稳定性。

### 3.2 负荷水平及光伏出力波动性对暂态电压稳定性的影响

现讨论系统负荷水平及光伏有功出力的波动性对  $t_{cct}$  的影响。表 1 给出光伏采用 PQ 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s, 系统负荷倍数分别为 1.0、1.6 时, 在不同的光伏有功出力下发生短路故障时对应的  $t_{cct}$  值(扰动条件同前)。由表 1 可知, 光伏有功出力的

表1 故障极限切除时间  $t_{cct}$  值Table 1 Fault critical clearing time ( $t_{cct}$ ) values

$P_{pv}/pu$	$t_{cct}/s$		$P_{pv}/pu$	$t_{cct}/s$	
	负荷倍数	负荷倍数		负荷倍数	负荷倍数
	1.0	1.6		1.0	1.6
1.0	2.20	0.95	0.4	2.31	0.86
0.9	2.22	0.93	0.3	2.33	0.84
0.8	2.23	0.92	0.2	2.35	0.83
0.7	2.25	0.90	0.1	2.37	0.81
0.6	2.27	0.89	0.0	2.39	0.80
0.5	2.29	0.87	—	—	—

波动性使  $t_{cct}$  值也发生波动, 且不同负荷倍数下  $t_{cct}$  受光伏波动性影响的变化规律不同, 负荷较轻时  $P_{pv}$  越小越有利于暂态电压稳定性, 重载时则相反。负荷倍数为 1.6 时的  $t_{cct}$  值均比负荷倍数为 1.0 时的对应值小得多, 说明重载运行对暂态电压稳定性非常不利。

负荷倍数为 1.6, 短路发生时  $P_{pv} = 1$  pu, 若令  $T_p = T_q = 0.015$  s, 则  $t_{cct} = 0.85$  s, 小于  $T_p = T_q = 0.15$  s 时的 0.95 s (如表 1 所列)。这是由于三相短路是最严重的故障形式, 同时系统重载非常不利于暂态电压稳定性, 进一步减小光伏逆变器响应时间常数已不能发挥有效作用。

若将光伏 PQ 模式换为 PV 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s, 负荷倍数保持 1.6, 短路发生时  $P_{pv} = 1$  pu, 则  $t_{cct} = 1.28$  s  $> 0.95$  s, 可知系统重载时光伏采用 PV 模式比 PQ 模式更有利于暂态电压稳定性。

### 3.3 动态无功补偿对暂态电压稳定性的影响

光伏取 PQ 模式,  $T_p = T_q = 0.15$  s, 负荷倍数为 1.6, 短路发生时  $P_{pv} = 1$  pu, 若在母线 14 处安装 SVC (100 Mvar), 则  $t_{cct} = 0.93$  s  $< 0.95$  s, 降低了暂态电压稳定性; 若安装 STATCOM (100 Mvar), 则  $t_{cct} = 1.10$  s  $> 0.95$  s, 可知系统重载时采用 STATCOM 进行动态无功补偿对提高暂态电压稳定性具有更好的效果。

## 4 结 论

本文以逆变器特性采用一阶传递函数表示的百兆瓦级大型光伏电站接入 IEEE 14 节点系统为例, 研究断线和短路故障对含大规模光伏的多机系统暂态电压稳定性的影响及相应的控制措施, 得到以下结论:

1) 和传统电网相比, 大型光伏电站接入多机系统后, 感应电动机仍是引发电压崩溃的主要因素。此外光伏逆变器的动态特性和光伏电站的运行模式也是影响系统暂态电压稳定性的重要因素。在系统发生断线故障(无论负荷轻重)及负荷水平较轻发生短路故障时, 较小的逆变器响应时间常数有利于系统恢复暂态电压稳定; 系统重载时发生短路故障, 进一步减小响应时间常数则不能再发挥有效

作用。而在光伏电站 2 种运行模式中,由于 PV 模式可调节光伏输出无功,因此系统重载下维持断线和短路时暂态电压稳定性的能力要明显优于 PQ 模式;而负荷水平较轻时采用 PV 模式并无优势。

2) 光伏电站以 PQ 模式运行时,系统负荷水平越重越不利于发生断线和短路故障时的暂态电压稳定性。系统重载时若光伏有功出力较大(如满发功率),则断线故障易造成系统发生电压崩溃。系统重载时若发生短路故障,无论光伏有功出力  $P_{pv}$  多大,均会导致故障极限切除时间  $t_{cct}$  大大减小,且  $P_{pv}$  越小,  $t_{cct}$  越小。

3) 系统重载运行下,发生断线故障时, SVC 和 STATCOM 均能有效提高暂态电压稳定性;发生短路故障时, STATCOM 的补偿效果远优于 SVC,建议大规模光伏发电并网系统安装 STATCOM 进行电压稳定控制。

#### [参考文献]

- [1] 丁 明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1—14.
- [1] Ding Ming, Wang Weisheng, Wang Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power system[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(1): 1—14.
- [2] Shah R, Mithulananathan N, Bansal R, et al. Influence of large-scale PV on voltage stability of sub-transmission system[J]. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 2012, 4(1): 148—161.
- [3] 李 升, 卫志农, 孙国强, 等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定分岔研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 17—23.
- [3] Li Sheng, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al. Voltage stability bifurcation of large-scale grid-connected PV system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 17—23.
- [4] 吴红斌, 王 蕾. 光伏发电系统建模及对配电网可靠性影响研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1197—1204.
- [4] Wu Hongbin, Wang Lei. Research on modeling of photovoltaic generation[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1197—1204.
- [5] Refaat S S, Abu-Rub H, Sanfilippo A P. Dynamic voltage stability impact of large-scale photovoltaic system on electric power grids[A]. 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2016) [C], London, United Kingdom, 2016, DOI: 10.1049/cp.2016.0575.
- [6] Yagami M, Ishikawa S, Ichinohe Y, et al. Transient stability analysis of power system with photovoltaic systems installed[J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2015, 9(10): 896—904.
- [7] Kabir S, Krause O, Bansal R, et al. Dynamic voltage stability analysis of sub-transmission networks with large-scale photovoltaic systems[A]. IEEE Power and Energy Society General Meeting [C], National Harbor, MD, USA, 2014, DOI:10.1109/PESGM.2014.6938877.
- [8] Kawabe K, Tanaka K. Impact of dynamic behavior of photovoltaic power generation systems on short-term voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3416—3424.
- [9] 曾平良, 韩家辉, 周勤勇, 等. 间歇式电源并网分析与规划辅助决策平台[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 35—41.
- [9] Zeng Pingliang, Han Jiahui, Zhou Qinyong, et al. Decision support platform for analysis and planning of intermittent generation integration[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 35—41.
- [10] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 翻译组(译), 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [11] Tamimi B, Cañizares C, Bhattacharya K. System stability impact of large-scale and distributed solar photovoltaic generation: the case of Ontario, Canada[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 680—688.
- [12] Taylor C W. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜(译), 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [13] 李立理, 陆 超, 黄志刚. 计及感应电动机的负荷节点暂态电压稳定解析评估办法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 1—8.
- [13] Li Lili, Lu Chao, Huang Zhigang. Analytical assessment of transient voltage stability of load bus considering induction motors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 1—8.

## STABILITY RESEARCH OF TRANSIENT VOLTAGE FOR MULTI-MACHINE POWER SYSTEMS INTEGRATED LARGE-SCALE PV POWER PLANT

Li Sheng<sup>1,2</sup>, Wei Zhinong<sup>1</sup>, Sun Guoqiang<sup>1</sup>, Wang Ziqi<sup>2</sup>

(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:** Taking the IEEE 14-bus system integrated with a centralized PV (photovoltaic) power plant as an example, the transient voltage stability of multi-machine power systems with large-scale PV plant is analyzed in detail using the time-domain simulation method. The simulation results show that besides the induction motor, the dynamic characteristics of PV inverter and operational mode of PV power plant are also important factors that can influence the transient voltage stability of the system. When short circuit fault at light load or line disconnection fault happen, the smaller response time constant of PV inverter is beneficial to restore the transient voltage stability of the system. PV system with heavy load adopting PV mode will be more beneficial to maintain the transient voltage stability than PQ mode. When PV power plant with heavy load operates in PQ mode, the short-circuit fault limit cut-off time is greatly reduced, and the disconnection fault is likely to cause a voltage collapse phenomenon under a large PV active output. The installation of dynamic reactive power compensation device STATCOM can effectively improve the transient voltage stability of multi-machine systems with PV under heavy load.

**Keywords:** PV power generation; fault; voltage collapse; transient voltage stability; inverter characteristics