

逆变器与 SVC 共同参与的光伏电站 无功协调控制研究

王海峰¹, 李凤婷², 崔巍¹

(1. 国网宁夏电力公司检修公司, 宁夏 银川 750000;

2. 新疆大学 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 光伏电站无功配置方案不考虑逆变器的无功输出能力, 存在投资成本偏大、补偿特性不理想等问题。针对目前光伏电站无功补偿方面存在的问题, 研究逆变器的无功输出能力, 论证了其参与无功调节的可行性, 提出适用于电压时变特性的逆变器与 SVC 共同参与下的光伏电站无功控制策略, 以提高光伏系统的暂态稳定性, 实现光伏电站无功补偿实用性与经济性的统一。

关键词: 光伏电站; 逆变器; 无功补偿

Abstract: The reactive power output capacity of reactive power allocation scheme for photovoltaic power station without considering the problems of inverters has a large investment cost and unsatisfactory compensation performance. So aiming at the problems of reactive power compensation in current photovoltaic power stations, the reactive power output capacity of the inverters is studied, its feasibility in reactive power regulation is demonstrated, and the reactive power control strategy is proposed for photovoltaic power station with the participation of inverters and SVC which has the voltage time-varying characteristics so as to improve the transient stability of photovoltaic system and realize the unification of reactive power compensation in applicability and economy for photovoltaic power station.

Key words: photovoltaic power station; inverter; reactive compensation

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0029-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.006

0 引言

目前并网的光伏电站主要采用 SVC、SVG 来进行无功补偿, SVC 的响应速度慢, 其无功输出能力受电压的影响较大。在补偿效果上 SVG 要优于 SVC, 但其价格昂贵, 会大大增加光伏电站的前期投资。

逆变器是光伏电站中不可缺少的设备, 其电路结构与 SVG 相一致, 目前光伏并网逆变器主要用于将直流电逆变成交流电。如果对光伏逆变器的控制策略进行改进, 可使其在完成逆变功能的同时输出一定的无功功率, 参与并网光伏系统的电压调节^[1-5], 但是目前中国光伏电站在规划设计中并未考虑其无功补偿和电压调节能力。

为充分发挥光伏并网逆变器的作用, 减少光伏电站无功补偿设备的投资成本, 提高光伏并网系统电压稳定性, 针对目前光伏电站无功配置存在的问题, 结合光伏电站的运行工况, 重点研究逆变器的无

功输出能力, 论证其参与无功调节的可行性; 并在此基础上提出逆变器参与调节, 同时适应光伏并网系统多变运行特性的协调控制策略。

1 光伏逆变器的功率输出控制

光伏逆变器在 d 、 q 旋转坐标系下的电压关系为

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + u_{sd} \\ u_q = L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + u_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为逆变器侧电压 d 、 q 轴分量; L 为 LC 滤波器等效电感; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电网侧电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为有功、无功电流的分量。逆变器 d 、 q 轴电流存在交叉耦合项 ωLi_d 、 ωLi_q , 不利于有功、无功的独立控制, 工程上为了解决这个问题, 应用如图 1 所示的前馈解耦控制策略^[6]。图中 U_a 、

U_b 、 U_c 为逆变器输出相电压, U_{ga} 、 U_{gb} 、 U_{gc} 为并网点相电压。

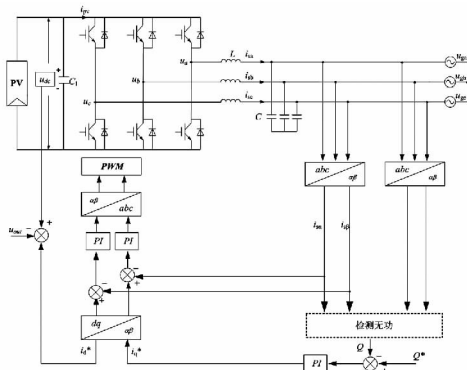


图1 逆变器有功、无功控制策略框图

其工作原理为: 将直流侧电压 U_{dc} 与参考电压 U_{out} 做差, 结果经过 PI 控制器后产生有功电流参考值 i_d^* ; 对网侧的无功进行实时检测, 将无功参考值 Q^* 和无功检测值 Q 做差, 同样经过 PI 控制器的调节, 得到无功电流参考值 i_q^* , 将 i_d^* 、 i_q^* 进行坐标变换, 得到 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* , 与网侧电流值进行比较, 经过 PI 调节、坐标变换最终得到 PWM 触发脉冲信号, 完成逆变器的有功、无功独立控制。控制方程为

$$\begin{cases} u_d = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_d^* - i_d) - \omega L i_q + u_{sd} \\ u_q = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + u_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_p 、 k_i 为 PI 调节系数; i_d^* 、 i_q^* 分别为有功、无功电流参考值。

采用瞬时无功检测技术检测并网点处无功功率, 将无功检测值与无功参考值进行比较, 经过 PI 控制, 最终实现逆变器无功补偿。

$$i_q^* = (k_p + \frac{k_i}{s})(Q^* - Q) \quad (3)$$

式中: Q^* 为无功功率参考值; Q 为无功测量值。

现阶段, 对 Q^* 的控制方法主要有: 恒无功功率控制、恒功率因数控制、基于并网点电压的变功率因数控制等^[7-9]。恒无功功率控制输出恒定的无功, 不能够对并网点的电压进行实时跟踪。恒功率因数控制通过对有功进行实时检测来计算无功功率, 但当有功输出较小时, 其输出的无功也随之减小。其无功输出表达式为

$$Q^* = P^* \tan\varphi \quad (4)$$

采用恒功率因数控制时其有功、无功与电压跌

落程度间的关系如图 2 所示。

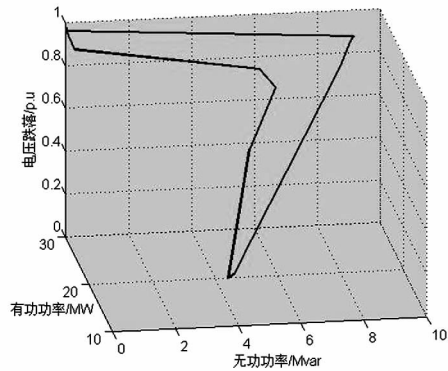


图2 有功、无功、电压跌落关系图

$Q(U)$ 控制策略的无功补偿效果要好于恒功率因数控制, 但其只对检测点电压的幅值进行检测, 检测值过于单一。其无功功率输出表达式为

$$Q^* = \begin{cases} Q_{\max} & (u_{\text{pec}} < u_1) \\ \frac{Q_{\max}}{u_1 - u_2}(u_{\text{pec}} - u_1) + Q_{\max} & (u_1 \leq u_{\text{pec}} \leq u_2) \\ 0 & (u_2 < u_{\text{pec}} \leq u_3) \\ \frac{Q_{\max}}{u_3 - u_4}(u_{\text{pec}} - u_3) & (u_3 < u_{\text{pec}} \leq u_4) \\ -Q_{\max} & (u_{\text{pec}} > u_4) \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_{pec} 为并网点电压标么值; Q_{\max} 为逆变器输出功率极限; u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 分别为 0.95 p. u.、0.98 p. u.、1.02 p. u.、1.05 p. u.。

基于 fortran 语言编写的部分控制程序如下:

```
IF ($ Vs, LT, 0.95)
THEN $ Q=0.5
ELSE IF ($ Vs, GT, 0.95, AND, $ Vs, LE, 0.98)
THEN $ Q=0.5 - 0.5/0.03* ($ Vs - 0.95)
ELSE IF ($ Vs, GT, 0.98, AND, $ Vs, LE, 1.02)
THEN $ Q=SQRT(0.5*0.5 - $ P* $ P)
ELSE IF ($ Vs, GT, 1.02, AND, $ Vs, LE, 1.05)
THEN $ Q= -0.5/0.03* ($ Vs - 1.02)
ELSE IF ($ Vs, GT, 1.05)
THEN $ Q= -0.5
END IF
```

基于并网点电压的变功率因数控制可以同时并对并网点电压和有功功率进行实时跟踪。其无功输出表达式为

$$Q^* = \begin{cases} P^* \tan \varphi_1 \dots\dots\dots (u_{pec} < u_1) \\ P^* \tan \left\{ \cos^{-1} \left[\frac{\cos \varphi_1 - 1.0}{u_1 - u_2} (u_{pec} - u_1) + \cos \varphi_1 \right] \right\} \dots\dots\dots (u_1 \leq u_{pec} \leq u_2) \\ 0 \dots\dots\dots (u_2 < u_{pec} \leq u_3) \\ -P^* \tan \left\{ \cos^{-1} \left[\frac{1.0 - \cos \varphi_2}{u_3 - u_4} (u_{pec} - u_3) + 1.0 \right] \right\} \dots\dots\dots (u_3 < u_{pec} \leq u_4) \\ -P^* \tan \varphi_2 \dots\dots\dots (u_{pec} > u_4) \end{cases} \quad (6)$$

采取变功率因数控制策略时,其输出有功、无功与电压跌落程度之间的关系如图3所示。

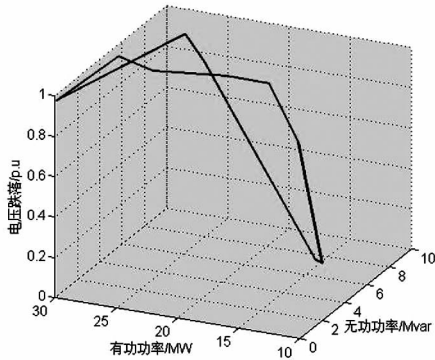
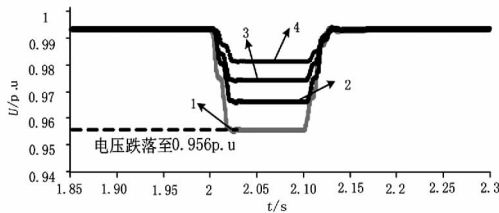


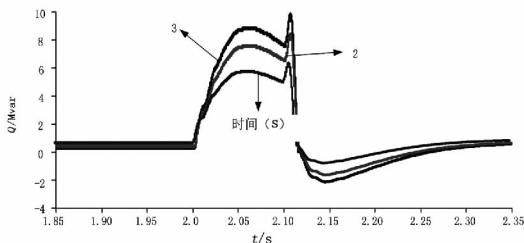
图3 电压跌落程度与有功、无功之间的关系

图4表示当并网点电压跌落至0.956 p.u.时,光伏逆变器在采用以上无功控制策略的情况下,对并网点电压的支撑情况。图5为对应图4中各无功控制策略输出的无功功率。



图注: 1 - 未采取无功控制; 2 - 恒功率因素控制; 3 - 基于并网点电压无功控制; 4 - 基于并网点电压的变功率因数控制

图4 不同无功控制策略下并网点电压



图注: 1 - 恒功率因数控制; 2 - 基于并网点电压无功控制; 3 - 基于并网点电压的变功率因数控制

图5 不同无功控制策略下无功输出情况

从图4、图5可以看出,在逆变器未采用无功控制策略时,并网点电压降至0.956 p.u.,采用上述各

种无功控制策略后,并网点电压都较之前有所提升,但对并网点电压的支撑效果有所差别。基于并网点电压的变功率因数控制策略的无功补偿效果较好,而恒功率因数控制策略发出无功功率较少,无功电压支撑能力最弱。这里通过基于并网点电压的变功率因数控制策略来获取无功功率参考值。

采用逆变器单独作用时,光伏电站能够对故障期间的并网点电压起到一定的支撑作用。但逆变器无功输出能力有限,根据公式 $Q = i_q^* U$,在电压跌落较深时,虽然无功电流比较大,但输出的无功功率可能满足不了要求^[10-11]。

2 逆变器参与下的光伏电站无功控制策略

基于以上研究,利用SVC与逆变器的无功输出能力,针对光伏电站并网电压的时变特性,给出满足电网要求的无功控制策略。

光伏电站的无功控制包含无功的整定和分配两个方面。在无功整定过程中,检测光伏电站的并网点电压,与并网点电压参考值做差,经过PI调节器获取维持并网点电压所需的无功^[12]。其中PI调节器的传递函数为

$$G_{PI}(s) = K_{PI} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_1}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_2}\right)} \quad (7)$$

式中: ω_1 、 ω_2 的取值与系统的相位裕度相关;比例积分系数 K_{PI} 的取值要结合并网光伏电站接入地区的电压、无功等具体情况。

在无功分配环节,根据光伏电站并网点电压的变化,提出逆变器与SVC协调配合的无功电压控制策略,控制流程如图6所示。

通过检测并网点电压的变化情况,计算光伏电站的无功需求,将光伏电站的无功需求与逆变器的无功输出能力进行比较,若光伏电站的无功需求小于逆变器的无功输出能力,则单独依靠逆变器来进行无功补偿;若光伏电站的无功需求大于逆变器的无功输出能力,将采取逆变器与SVC共同对光伏电站进行无功补偿。

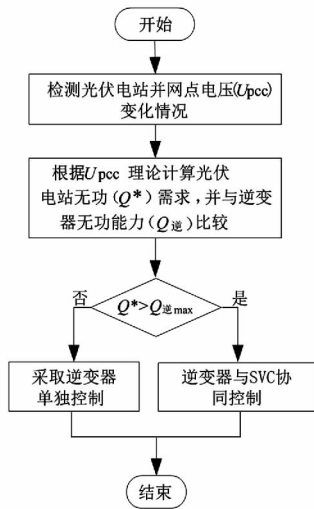


图6 光伏电站无功控制策略流程图

3 逆变器参与下的光伏电站无功控制策略仿真验证

在对逆变器、SVC 的无功输出互补特性进行研究的基础上,仿真分析当并网点电压变化时,所提出的无功控制策略对并网点电压的支撑作用,验证所提无功控制策略的正确性。

3.1 光照渐变时无功电压控制策略仿真验证

当光照强度渐变时,并网点电压发生波动。基于上述的光伏电站无功控制策略,仿真分析当光照强度渐变时,光伏电站的无功输出能力及其对并网点电压的支撑作用。仿真结果见图7至图10。

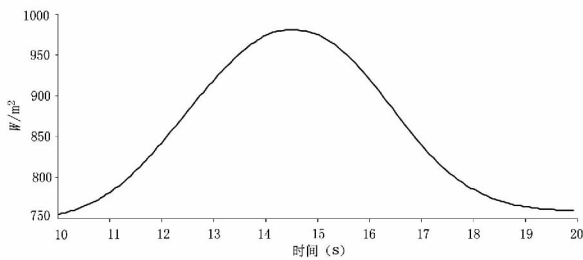


图7 光照强度渐变曲线

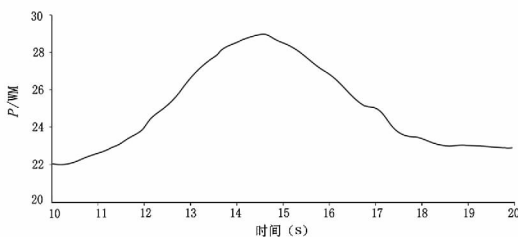


图8 光照渐变时有功输出变化

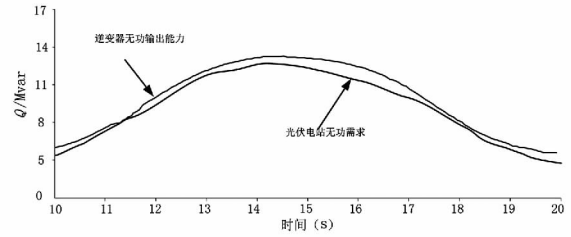


图9 光伏电站无功需求与逆变器无功输出情况

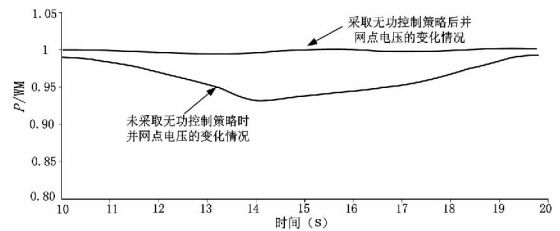


图10 光照渐变时并网点电压变化情况

由图7至图10可以看出,当采取所提的无功电压控制策略时,并网点电压能够稳定在1.0 p. u. 附近。而且,从图9可以看出,光伏电站的无功需求量小于逆变器的无功输出量,仅依靠逆变器的无功输出能力就能实现光伏电站的无功电压稳定控制。

3.2 光照突变时无功电压控制策略仿真验证

在未采取光伏电站无功控制策略的情况下,当光照强度发生突变时,光伏电站有功输出和并网点电压的变化情况如图11至图12所示。

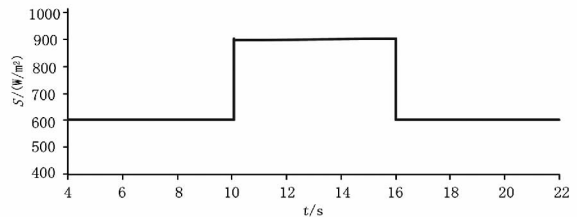


图11 光照强度突变曲线

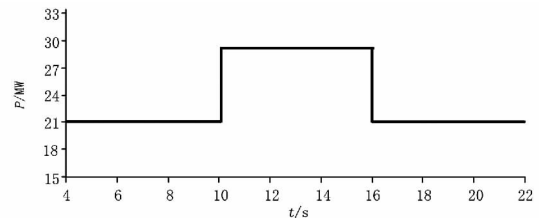


图12 光照突变时有功输出变化

基于上述的光伏电站无功控制策略,仿真分析当光照强度突变导致并网点电压变化时,光伏电站的无功输出能力及其对并网点电压的支撑作用,仿真结果见图13至图15。

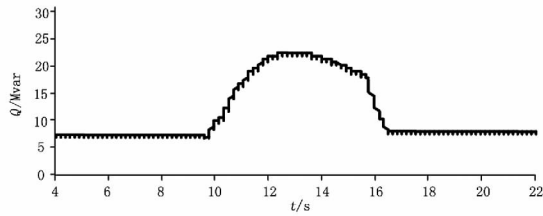


图 13 光伏电站无功参考值

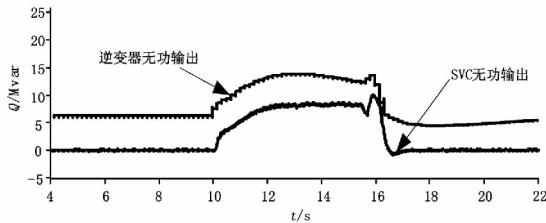


图 14 逆变器与 SVC 无功输出

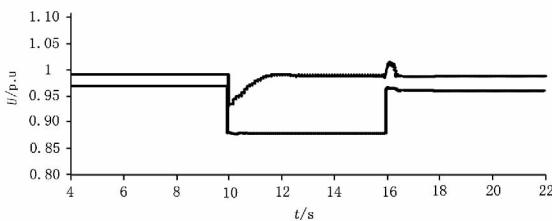


图 15 光照突变时并网点电压变化曲线

由图 13 至图 15 可知,当未采取无功控制策略时,并网点电压跌落至 0.87 p. u. 附近,光照突变结束后,并网点电压也只能稳定在 0.96 p. u.。当采取上述无功电压控制策略后,并网点电压最低跌落点可提升至 0.93 p. u.,在光照突变期间,并网点电压保持在 0.98 p. u.,且光照突变结束后,经过短暂的恢复过程能较好的稳定在 1.0 p. u. 左右。此时光伏电站无功需求量大于逆变器的无功功率输出,采取逆变器与 SVC 共同输出无功支撑并网点电压。

4 结 论

大型光伏并网会导致电网电压波动、无功需求变化等一系列问题的发生。目前光伏电站采用的无功配置方案使光伏电站的前期投资较大。基于逆变器和 SVC 无功输出的互补特性,从经济性和补偿效果两方面来考虑,提出逆变器参与下的适用于不同电压跌落的大型光伏电站无功控制策略,并进行仿真验证。研究表明,所提无功控制策略充分利用了 SVC 和逆变器无功输出的互补特性,在电压变化时,能够有足够的无功补偿能力保证电网的稳定性,实

现了光伏电站无功控制经济性与实用性的统一。

参考文献

- [1] 许晓艳,黄越辉,刘纯,等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.
- [2] 时光,王海云,王维庆. 基于 SVS 与 STATCOM 协同系统提高光伏电站暂态稳定性研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(3): 283-286.
- [3] 罗剑波,陈永华,刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.
- [4] 郑海涛,郑昕,吴兴全,等. 大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 149-154.
- [5] Braun M. Technological Control Capabilities of DER to Provide Future Ancillary Services[J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2007, 3(3): 191-206.
- [6] 费丽强,赵娜. 基于 OLTC 和 SVC 的光伏并网发电电压控制技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(5): 50-53.
- [7] 鲍新民,许士光. 光伏电站无功电压控制策略的研究[J]. 低压电器, 2014(4): 32-36.
- [8] 张泽斌. 具有 LVRT 能力的光伏并网逆变器控制策略研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [9] 于洋,黄亚峰,严干贵,等. 光伏电站内的逆变器无功调节能力分析与控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2014(13): 70-75.
- [10] 陈波,朱晓东,朱凌志,等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 6-12.
- [11] 张雅静,郑琼林,卢远宏,等. 光伏并网逆变器低电压穿越优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(6): 984-990.
- [12] 晁阳. 并网光伏发电系统无功电压控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

作者简介:

王海峰(1990), 硕士, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护;

李凤婷(1965), 博士、教授, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2017-03-06)