分布式光伏就地自适应电压控制策略研究

方景辉[1]，温 镇[2]

(1.嘉兴恒创电力设计研究院有限公司，浙江 嘉兴 314033；2.国网嘉兴供电公司，浙江 嘉兴 314033)

摘要：随着分布式光伏发电系统规模化、多点接入配电网，其对配电网的运行控制、调度管理等方面的影响也逐渐凸显，其中无功电压控制问题是较为显著的问题之一。分布式光伏发电系统的输出电能受到光照、气候等自然因素的影响，具有较强的随机性、间歇性与波动性，难以准确预测。另外，分布式光伏海量接入，难以对所有光伏额外整合测量设备和控制设备，部分光伏难以观测和控制。鉴于此，针对分布式光伏规模化并网场景，综合考虑并网分布式光伏的不可控和不可调度特性，提出分布式光伏就地自适应电压控制策略。针对配电网多种运行工况提出电压期望值自适应调整方案，进而采用就地的、智能的自适应方法来调节电压。利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台，在多种仿真场景下仿真分析和比较了就地自适应电压控制策略的电压控制恢复效果，验证了所提电压控制策略的有效性和鲁棒性。

关键词：分布式光伏；配电网；就地；自适应；电压控制

Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV

FANG Jinghui[1], WEN Zhen[2]

(1. Jiaxing Hengchuang Electric Power Design Institute Co.,Ltd., Jiaxing 314033, China;
2. State Grid Jiaxing Power Supply Company, Jiaxing 314033, China)

Abstract: As distributed photovoltaic systems (DPVS) connected to the distribution network, its associated influences on operation, control and dispatching management also gradually highlight, among them the reactive voltage control is one of the more significant problems. The power output of the DPVS is affected by the light, climate and other natural factors, which makes it have strong randomness and intermittent and volatility and be difficult to predict. In addition, it is hard to measuring equipment and control equipment for each DPVS when huge number of DPVSs access to distributed network, thus parts of DPVSs cannot be observed and scheduled. In view of this, considering the unobservable and un-dispatching ability, a local adaptive voltage control strategy is proposed for the DPVS, correspondingly a voltage expectations adaptive adjustment scheme is proposed for various operation modes of distribution networks to achieve local voltage control in an intelligent and adaptive manner. Based on PSCAD/EMTDC electromagnetic transient, simulation results of many cases show the effectiveness and robustness of the proposed scheme.

Key words: distributed photovoltaic systems (DPVS); distribution networks; local; adaptive; voltage control

中图分类号： TM615 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)23-0049-07

0 引言

近年来，我国政府出台了一系列政策，推动光伏(Photovoltaics, PVs)发电技术及其相关产业的规模化发展和应用。国家电网公司也高度重视光伏等新能源发电技术的发展，采取积极措施大力推动 PV 发电技术的实质性进展，使我国成为 PV 发电装机增长速度最快的国家之一[1-6]。目前，我国的 PV 发电主要包括大规模集中式光伏电站发电(Photovoltaic power station)和分布式光伏发电(Distributed Photovoltaic Systems, DPVS)两种，PV 发电系统均通过逆变器并网，利用逆变器控制实现有功、无功的解耦，并使 PV 能采用逆变器无功控制为电网提供电压支撑。尤其当 PV 高渗透并网时，其逆变器的无功控制调压能力甚至可完全取代调压电容器。但国内对 PV 并网无功控制方面的研究，主要集中在单位功率因数并网控制以及光伏与无功补偿全局无功电压控制等方面，通过负载无功电流调整无功

补偿控制参考值，适用于对负载的无功补偿，难以适用于 DPVS 的无功独立控制[7-8]。另外，在 DPVS 高渗透率接入电网场景下，若对每个 DPVS 额外整合测量设备和控制设备，将显著增加系统的连接成本，因而仅对系统中部分 DPVS 增设测量和控制设备，而其他部分 DPVS 由于未设置测量和控制设备，将难以观测，且难以实现控制或调度[9-10]。

因此，综合考虑 DPVS 的不可控和不可调度特性以及其无功功率调节能力，针对 DPVS 提出一种就地自适应电压控制技术，充分发挥 DPVS 本身的无功电压控制能力，提升 DPVS 的电压控制和调节能力，促进 DPVS 的高渗透消纳，发挥光伏发电的能效和环境效益。

1　DPVS 模型

完整的 DPVS，由 PV 发电阵列、DC-DC 斩波器、DC-AC 并网逆变器以及控制系统组成，如图 1 所示。

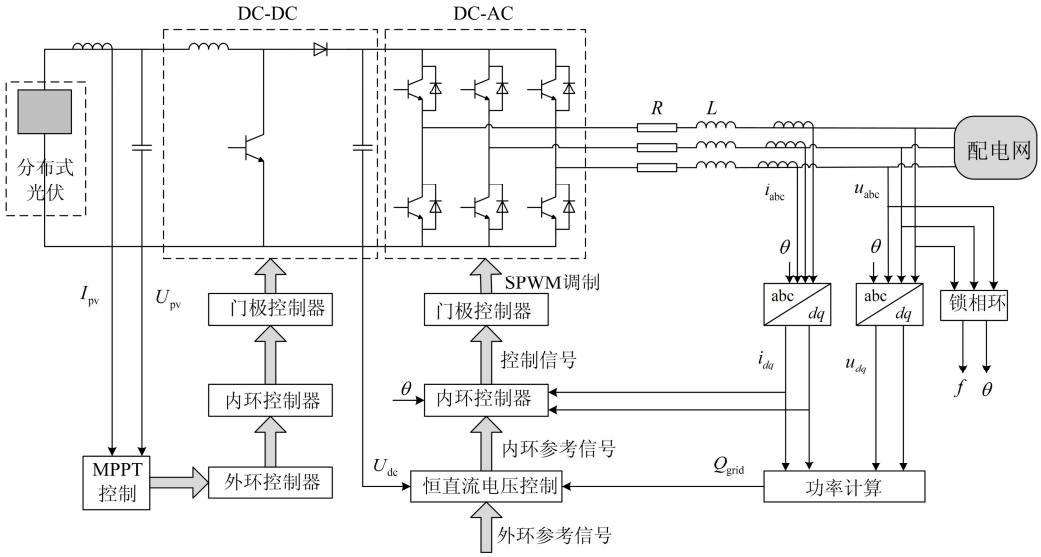

图 1 DPVS 系统结构图

Fig. 1 Structure of DPVS

1.1 PV 电池阵列数学模型

PV 发电技术，是利用半导体材料的光电效应或光化学效应直接将光能转化为电能的发电技术，具有不消耗燃料无枯竭危险、环保无公害、规模大小灵活、维护安全可靠简单等优点[11-12]。由于单个太阳能光伏电池单元输出的电压和功率较小，因此将光伏组件规模化并联以形成光伏阵列来获取电能。PV 发电的核心是光伏电池，等效电路见图 2。

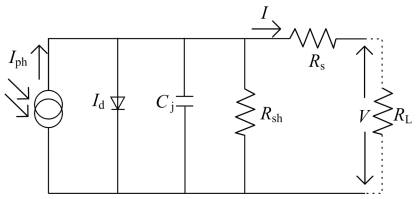

图 2 PV 电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of PV battery

光伏发电系统是通过光伏电池阵列(PV Array)吸收太阳能，将光能直接变成电能输出。光伏电池阵列是一种能利用半导体 PN 结的光伏效应，直接将光能转换成电能的装置。作为整个 PV 系统的核心部分，其输出特性与环境因素关系密切，受温度和光照强度的变化影响较大，在温度或光照强度变化时均会造成 PV 系统出力波动。

如图 2 中所示，I_{ph} 为光生电流，I_d 为二极管结电流，C_j 为结电容，R_s 为串联电阻、低阻值小于 1 Ω，R_{sh} 为并联电阻、高阻值数量级为 10^3 Ω，PV 电池的特性方程可表示如式(1)。

$$I = I_{ph} - I_0\left\{\exp\left[\frac{q(V+R_sI)}{nkT}\right]-1\right\} - \frac{V+R_sI}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中：I 为 PV 输出电流(工作电流)；V 为 PV 输出电压(工作电压)；I_0 为反向饱和电流；q 为电子电荷量，q=1.6×10^{19} C；n 为二极管因子(取值范围 1~5)；k 为玻尔兹曼常数，k=1.38×10^{-23} J/K。

为了提高 PV 电池模型的实用性，需对其详细模型进行简化处理：(1) 忽略$(V+R_sI)/R_{sh}$ 项；(2) 假设 $I_{ph}=I_{sc}$。简化处理后的 I-V 特性方程可表达为

$$I = I_{sc}\times(1-B_1\times(e^{V/(B_2V_{oc})}-1)) \quad (2)$$

式中：I_{sc} 为 PV 短路电流；V 为 PV 的输出电压；V_{oc} 为 PV 的开路电压；B_1、B_2 为待定系数。

1.2 PV 并网逆变控制数学模型

光伏并网逆变器是并网光伏发电系统能量转换和控制的核心，其性能决定了整个光伏并网系统的稳定、安全、可靠和高效运行。光伏逆变器是光伏发电系统的核心设备，也是光伏发电系统建模的关键。光伏并网发电系统存在诸如单级式、多级式以及单相、三相等多种拓扑结构[13-16]。典型光伏电站并网发电系统采用 DC/AC 逆变器控制并入电网，目前市场上使用的大多数逆变器采用 PQ 控制模式，从而更有效地利用太阳能，典型系统结构图如图 1 所示。假设光伏逆变器三相对称、三相之间没有耦合电感且忽略分布参数的影响，根据基尔霍夫电路定理可以得到逆变器交流侧电压方程为

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：v_{ga}、v_{gb}、v_{gc} 是电网电压；v_a、v_b、v_c 是逆变桥交流侧电压；i_a、i_b、i_c 为并网电流。

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U\cos\omega t \\ U\cos(\omega t-120°) \\ U\cos(\omega t+120°) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ku_{dc}\cos(\omega t+\delta) \\ ku_{dc}\cos(\omega t-120°+\delta) \\ ku_{dc}\cos(\omega t+120°+\delta) \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：U 是电网电压峰值；k 为直流电压利用系数；δ 为逆变器输出电压与电网电压的夹角；k 和 δ 都是逆变器可控量；ω 为电网基波角频率。

忽略逆变器功率损耗，PV 逆变器输出有功功率为

$$P = u_{dc}i_{dc} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \tag{6}$$

对式(3)、式(4)采用派克变换，可得到三相全桥逆变器在 d-q 轴上的数学模型为

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{D}\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_d u_{dc} \\ k_q u_{dc} \\ k_0 u_{dc} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中变换矩阵 $\boldsymbol{D}$ 为

$$\boldsymbol{D} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120°) & \cos(\theta+120°) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120°) & -\sin(\theta+120°) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{8}$$

由于三相对称系统中不存在零序分量，因此式(8)可简化如下：

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L}\begin{bmatrix} v_d-u_d \\ v_q-u_q \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_d u_{dc} \\ k_q u_{dc} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：i_d、i_q 分别表示交流侧输出电流的 d 轴和 q 轴分量；当 d 轴初始相位角为 0 时，交流侧输出电压在 d、q 轴上的直流电压利用系数分量，分别可用 $k_d=k\cos\delta$、$k_q=k\sin\delta$ 表示；u_d、u_q 分别是网侧电压矢量的 d、q 轴分量。

直流侧电压方程：

$$C_{dc}\frac{d}{dt}u_{dc} = i_{pv} - i_{dc} \tag{11}$$

注入电网的有功和无功功率分别为

$$p = u_{dc}i_{dc} = \frac{3}{2}\left(u_d i_d + u_q i_q\right) \tag{12}$$

$$q = \frac{3}{2}\left(u_d i_q - u_q i_d\right) \tag{13}$$

2　DPVS 就地自适应电压控制策略

2.1 DPVS 就地自适应电压控制架构

大量 DPVS 规模化接入电网，对每个 DPVS 额外增设测量设备和控制设备，将需增加大量的连接成本，因此电网中部分未安装测量和控制设备的 DPVS 将难以观测、控制或调度。为应对上述问题，综合考虑并网光伏电站的不可观测性和不可调度性，提出一种 DPVS 就地自适应电压控制策略，采用就地的、智能的自适应方法来调节电压，其基本控制架构如图 3 所示。

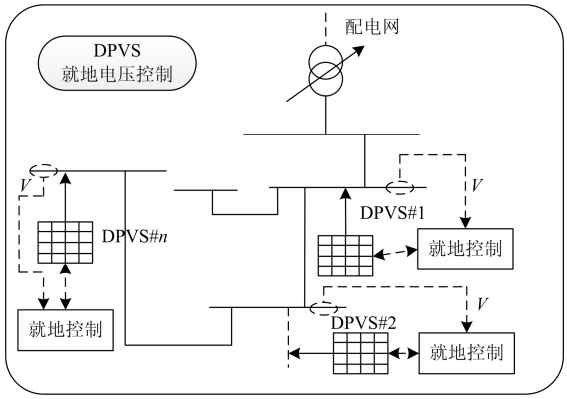

图3 DPVS就地自适应电压控制架构

Fig. 3 Local adaptive voltage control framework of DPVS power station

如图 3 所示，DPVS 采用本地测量仪器监测电压的变化及其关键水平，DPVS 就能调整自己来适应各种运行工况。自适应就地控制能够维持 DPVS 并网点的电压在可接受的限制范围内，并能参与区域配电网的优化电压控制。

2.2 DPVS 就地自适应电压控制原理

DPVS 就地自适应电压控制的目的是将 DPVS 并网点的电压维持在期望的电压水平或可接受的电压限值范围内，其基本原理如图 4 所示。DPVS 就地自适应电压控制的基本原理是通过无功功率和有功功率参考值的调整控制，实现对电压的控制。当电压水平超过期望值，或者超过配电网操作管理中心的规定值时，利用就地自适应电压控制将电压维持在期望值或规定值要求的范围之内。DPVS 规模化并网后，就地自适应电压控制的主要功能不仅是维持 DPVS 并网点的电压，而且还要保证并网区域电网的电压水平。DPVS 就地自适应电压控制，仅需 DPVS 并网点处的本地测量信息，以电压和电流测量值作为控制的输入变量，因此，DPVS 就地自适应电压控制是分散本地控制，无需与其他电气节点之间进行通信，也不需要配电网操作管理中心的信息通信联系。

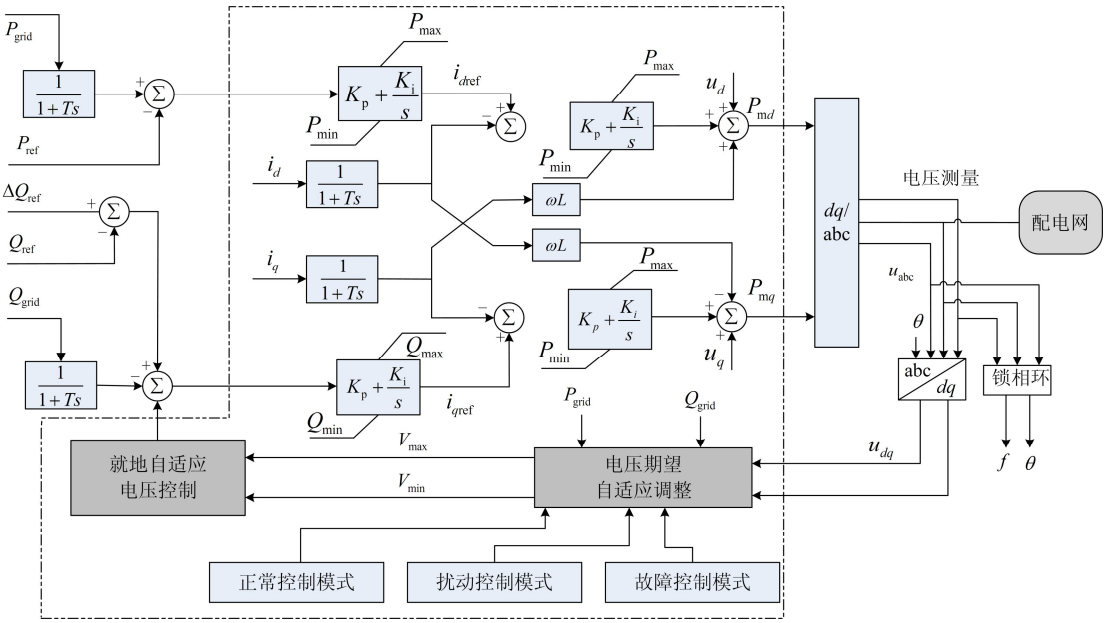

图 4 DPVS 就地自适应电压控制基本原理

Fig. 4 Local adaptive voltage control principles of DPVS

2.3 DPVS 就地自适应电压控制策略

DPVS 就地自适应电压控制中的期望电压的限值，最高电压限值 V_{max} 和最低电压限值 V_{min} 是控制的关键变量，是实现就地自适应电压控制的核心，因此，提出一种自适应变化的电压期望范围设定方法，在维持 DPVS 并网点电压的同时，保证并网区域电网内其他电气节点电压在可接受范围内，从而保证并网区域电网的整体电压水平。针对不同的运行工况，制定不同的 DPVS 自适应电压期望设定方法以及自适应电压控制策略，各工况下电压期望设定及电压控制策略分别表述如下。

正常控制模式：针对正常运行工况，自适应电压期望可根据电压测量值设定，设定的电压期望限制范围相对较小，使电压维持在定义的电压期望限制范围内($V_{min,1} \le V \le V_{max,1}$)；此时，DPVS 运行在正常控制模式下，即运行在有功功率和无功功率控制模式(PQ 控制模式)。

扰动控制模式：在扰动运行工况下，自适应电压期望的设定，可以根据该等级电网可接受的电压最大水平进行设定($V_{min,2} \le V \le V_{max,2}$)，即设置 $V_{max,2}$ 和 $V_{min,2}$ 分别为该等级电网可接受的电压最大值和最小值，在电网电压偏差约束要求下，维持电压在规定的范围内；在扰动工况下，DPVS 由 PQ 控制模式切换到扰动控制模式，即无功电压控制模式，该模式利用无功功率参考值调整控制，吸收/发出无功功率来降低/提高电压，从而实现 DPVS 并网点的就地电压控制。当电压值太高或太低时，光伏电站将电压控制在期望的最低或最高限值；当 DPVS 没有足够的吸收或发出无功功率的能力，而电压已超过可接受限值时，需转入到紧急运行工况下的紧急控制模式。

故障控制模式：在故障紧急运行工况下，电压

超过了可接受的限制范围($V < V_{\min,2}$ 或 $V > V_{\max,2}$)，且 DPVS 已经达到最大可发出感性或容性无功功率，无法再提供无功功率支撑，为电网提供无功补偿；此时 DPVS 切换到紧急控制模式，即有功控制模式，通过降低 DPVS 发出的有功功率，在 DPVS 关口功率因数可调范围(超前 0.95~滞后 0.95)内，增加无功功率的最大限值，即 $Q=\sqrt{S^2-P^2}$，如此可间接提升无功功率，从而帮助电压恢复到电压限值 $V_{\min,2}$ 或 $V_{\max,2}$。

根据就地自适应电压控制策略对无功功率进行控制，其控制器典型结构图如图 3 所示。

其控制过程可描述为式(14)。

$$\begin{cases} i_{d\mathrm{ref}}=(k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{i}}}{s})(P_{\mathrm{ref}}-P_{\mathrm{grid}}) \\ i_{q\mathrm{ref}}=(k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{i}}}{s})(Q_{\mathrm{ref}}+\Delta Q_{\mathrm{ref}}-Q_{\mathrm{grid}}) \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} P_{\mathrm{m}d}=(k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{i}}}{s})(i_{d\mathrm{ref}}-i_d)-\omega L i_q+u_d \\ P_{\mathrm{m}q}=(k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{i}}}{s})(i_{q\mathrm{ref}}-i_q)+\omega L i_d+u_q \end{cases} \tag{15}$$

式中：P_{grid}、Q_{grid}、i_d、i_q 分别为有功、无功功率以及有功、无功电流的实测值；P_{ref}、Q_{ref}，$i_{d\mathrm{ref}}$、$i_{q\mathrm{ref}}$ 为对应的参考值；u_d、u_q 分别为有功、无功电压的实测值；k_{p}、k_{i} 为 PI 控制器的控制参数，各 PI 控制器的控制参数可根据实际需要自行调整；根据就地电压控制策略，调整光伏无功功率参考值，再利用光伏并网逆变器双环控制策略，实现电压就地控制。

3　仿真研究

3.1 仿真系统

针对欧盟低压配电网进行仿真研究[16]，仿真所用系统如图 5 所示。

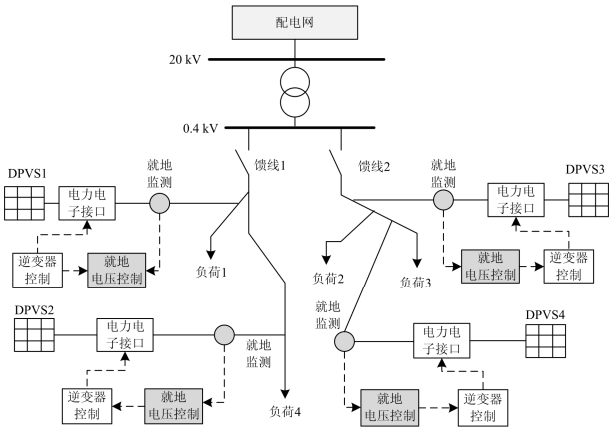

图 5 光伏接入配电网结构图

Fig. 5 Distribution network with PVs

仿真系统由 4 个 DPVS 发电单元和多个负荷组成，每个 DPVS 均采用逆变器控制并网，并安装就地监测装置，进而通过就地自适应电压控制策略提高系统的电压稳定性。

为了充分验证所提就地自适应电压控制策略的有效性，分别针对以下三个场景进行仿真对比分析：

(1) DPVS 并网工况：在 $t=2$ s 时，DPVS1 并网运行，就地自适应电压控制运行在正常控制模式下；

(2) DPVS 出力扰动工况：在 $t=7.5$ s 到 $t=17.5$ s 期间，DPVS1 出力波动，就地自适应电压控制运行在扰动控制模式下；

(3) 紧急故障工况：在 $t=5$ s 时，DPVS1 发生单相接地短路故障，就地自适应电压控制运行在正常控制模式下。

3.2 DPVS 并网电压控制

利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台，通过对比分析就地自适应电压控制使用前后的调压特性差异，以验证就地自适应电压控制策略的电压控制恢复效果，仿真结果如图 6 所示。

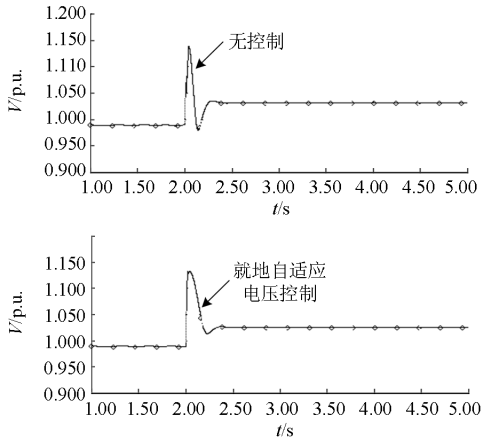

图 6 DPVS 并网时就地自适应电压控制对比曲线

Fig. 6 Control performances during integration of DPVS

对比图 6 中电压变化曲线可知，采用光伏电站就地自适应电压控制策略，利用光伏电站无功功率参考值调整和控制，进而提升并网无功功率来提高并网点电压水平；由图中曲线可知，使用光伏电站就地自适应控制后，光伏电站并网点稳态电压水平提高了约 0.01 p.u.，电压波动也相应减小，结果表明了就地自适应电压控制策略的有效性，有效抑制了 DPVS 并网引起的电压升高问题。

3.3 DPVS 出力扰动下电压控制

为了进一步证明光伏电站就地自适应电压控制策略的效果，针对 DPVS 出力波动场景，对比分析就地自适应电压控制使用前后的差异，以表明就地

自适应电压控制策略的有效性，基于 PSCAD/EMTDC 仿真结果如图 7 所示。

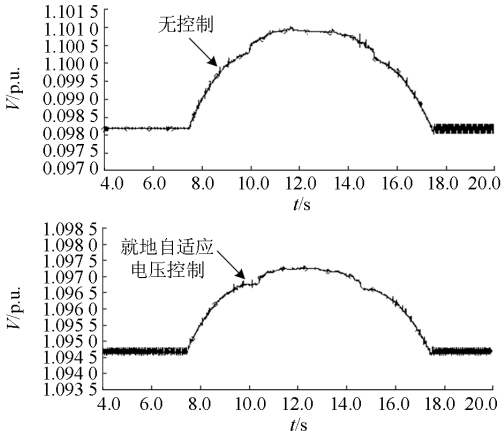

图 7 DPVS 出力波动下就地自适应电压控制对比曲线

Fig. 7 Control performances under fluctuation of DPVS

3.4 故障情况下电压控制

针对故障场景仿真分析就地自适应电压控制策略的电压控制效果，进一步验证光伏电站就地自适应电压控制策略的鲁棒性和适应性，仿真曲线如图 8 所示。

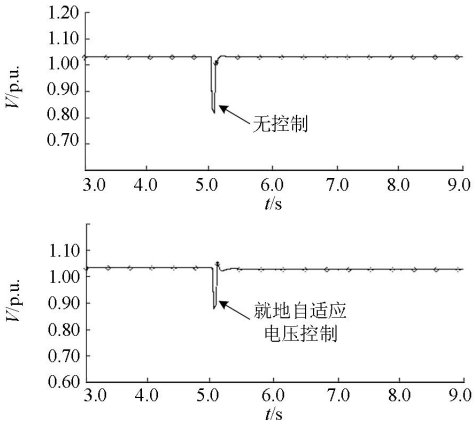

图 8 故障下就地自适应电压控制对比曲线

Fig. 8 Control performances under fault of DPVS

由图 8 可知，当配电网发生单相短路接地故障时，DPVS 并网点电压发生短期低电压现象，电压跌落至 0.82 p.u. 左右，而采用就地电压控制策略后，通过无功功率参考值的调整和控制以及有功功率的调节，使电压跌落至约 0.9 p.u.即开始恢复，有效避免了系统故障低电压。

4　结论

本文对 DPVS 的就地自适应电压控制技术进行了针对性研究，利用 PSCAD/EMTDC 在三种典型工况下对所提 DPVS 就地自适应电压控制策略进行了仿真验证和分析，证明了所提就地自适应电压控制策略的有效性、适应性和鲁棒性，可提高 DPVS 并网电压控制能力，并提升电网接纳 PV 的能力，从而促进光伏的合理高效应用。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家标准. GB/T 12325-2008 电能质量供电电压偏差[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[2] 国家电网公司. Q/GDW617-2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 国家电网公司办公厅, 2011.

[3] 潘琪, 徐洋, 高卓. 含分布式光伏电站接入的配电网三级电压控制系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 64-68.
PAN Qi, XU Yang, GAO Zhuo. Design of three level voltage control system in distribution network with the connection of many distributed photovoltaic power plants[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 64-68.

[4] 翟文杰, 李建泉, 吴小云, 等. 分布式光伏发电对配电网供电电压的影响研究[J]. 大功率变流技术, 2013(4): 43-47.
ZHAI Wenjie, LI Jianquan, WU Xiaoyun, et al. Research on impact of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network[J]. High Power Converter Technology, 2013(4): 43-47.

[5] 孙芊, 王倩, 杨利萍, 等. 针对分布式光伏接入的配电网改造方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 60-65.
SUN Qian, WANG Qian, YANG Liping, et al. Reconstruction Method of Distribution Network with Access of Distributed Photovoltaic Power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 60-65.

[6] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.
Yang Ming, Zhou Lin, Zhang Dongxia, et al. Stability Analysis of Large-Scale Photovoltaic Power Plants for the Effect of Grid Impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.

[7] 凌红星, 赵晶晶, 孙改平, 等. 高密度多接入点屋顶光伏系统对配电网电压的影响[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(2): 106-110.
LING Hongxing, ZHAO Jingjing, SUN Gaiping, et al. Influence on distribution voltage by high-density

multi-access point rooftop photovoltaic system[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(2): 106-110.

[8] 景雷, 孙金华. 大型太阳能光伏电站仿真建模及并网技术研究[J]. 华东电力, 2013, 41(11): 2317-2322.
JING Lei, SUN Jinhua. Simulation modeling and grid-connection technology for large-scale PV power station[J]. East China Electric Power, 2013, 41(11): 2317-2322.

[9] 吕志盛, 闫立伟, 罗艾青, 等. 新能源发电并网对电网电能质量的影响研究[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 251-255.
LÜ Zhisheng, YAN Liwei, LUO Aiqing, et al. Impact of new energy power grid-integration on grid power quality[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 251-255.

[10] 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.

[11] 赵平, 严玉廷. 并网光伏发电系统对电网影响的研究[J]. 电气技术, 2009, 3(4): 41-44.
ZHAO Ping, YAN Yuting. Research on effect of grid-connected photovoltaic system on power grid[J]. Electrical Engineering, 2009, 3(4): 41-44.

[12] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

[13] 黄欣科, 王环, 王一波, 等. 光伏发电系统并网点电压升高调整原理及策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 112-117.
HUANG Xinke, WANG Huan, WANG Yibo, et al. Principle and strategies of voltage rise regulation for grid-connected photovoltaic generation system at point of common coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 112-117.

[14] 葛虎, 毕锐, 徐志成, 等. 大型光伏电站无功电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 45-51.
GE Hu, BI Rui, XU Zhicheng, et al. Research on reactive power and voltage control of large-scale photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 45-51.

[15] 杨文杰. 光伏发电并网与微网运行控制仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
YANG Wenjie. Simulation and research of grid connected photovoltaic generation and microgrid operation control[D]. Chengdu: Souhtwest Jiaotong University, 2010.

[16] 王成山. 微电网仿真和分析理论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Wang Chengshan. Analysis and Simulation Theory of Microgrids[M]. Beijing: Science press, 2013.

收稿日期：2015-01-27；　　修回日期：2015-07-02

作者简介：

方景辉(1981-)，男，高级工程师，主要从事电力系统规划设计及工程技术管理工作；E-mail: 3264099@qq.com

温　镇(1985-)，男，硕士，工程师，技师，中国电机工程学会会员，IEEE 会员，主要从事分布式光伏发电研究，输电线路研究等。E-mail: 346374222@qq.com

(编辑　魏小丽)