DOI: 10.7667/PSPC151809

计及风电场静态电压稳定性的 VMP 系统无功电压控制策略研究

李自明[1]，姚秀萍[2]，王海云[1]，王维庆[1]，常喜强[2]，郭小龙[2]

(1.新疆大学电气工程学院可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心，新疆 乌鲁木齐 830047；
2.新疆电力调度控制中心，新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要：随着规模化、集群化风电基地的初步建成，风电作为一种清洁高效的能源得到了快速的发展，但短时间内大规模风电场集中接入电网，给电网的功率平衡带来扰动，造成了电网电压的不稳定。针对风电场并网后的电压控制问题，研究了大规模风电场并网的静态电压稳定机理。并在现有调压手段的基础上，通过适时调整风电机组无功出力，升压站变压器抽头以及调无功补偿装置，进一步提出了基于分层管理的无功功率/电压控制策略，并将该策略嵌入到风电场电压/无功自动管理平台(VMP)。通过新疆某地区风电场现场试验发现，该控制策略能够改善低电压穿越期间无功表现，提高风电场无功电压的稳定性，同时避免了功率振荡的产生。该研究结果可以为风电场无功电压协调控制的理论研究和工程实际提供参考依据。

关键词：风电并网；静态电压稳定；VMP 系统；无功电压控制

Study on reactive power and voltage control strategy of VMP system considering static voltage stability of wind farm

LI Ziming[1], YAO Xiuping[2], WANG Haiyun[1], WANG Weiqing[1], CHANG Xiqiang[2], GUO Xiaolong[2]

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation＆Grid Technology Approved by Education Ministry for its Establishment under College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;
2. Xinjiang Electric Power Dispatching and Control Center, Urumqi 830001, China)

Abstract: With the preliminary development of large-scale and cluster wind power base, wind power has been developed rapidly as a clean and efficient energy. But extensive wind farms are connected to the power grid in a short time, which brings disturbance to the power balance and cause the instability of the voltage of the power network. According to the voltage control problems of wind farm integration, in this paper, the mechanism of static voltage stability of large-scale wind farm group is studied. Through adjusting the reactive power of the wind power generator, the transformer taps of boost substation and the reactive power compensation device are timely adjusted on the basis of existing adjustment method for voltage. A reactive power/voltage control strategy based on hierarchical management is further proposed, which is embedded into the voltage/var management platform (VMP) for wind farm. It is found that the control strategy can improve the performance of reactive power during the period of low voltage ride through, and improve the stability of the reactive power and voltage of the wind farm, and also avoid the generation of power oscillation by the test-in-place of a certain area in Xinjiang. The study provides a basis and reference for theoretical research and practical engineering on reactive power coordinated control strategy for wind farms.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267017).

Key words: wind power integration; static voltage stability; VMP system; reactive power and voltage control

0 引言

近年来，随着对清洁能源建设的大力推进，包括现在拟建的大型风力发电项目，地理位置上都远离负荷中心，并通过相对较弱的输电网络相连。在这样传输网络中的风电场存在严重的安全性和稳定性问题[1-2]。诸如风电场缺乏行之有效地无功电压评判体系，无功功率/电压管理系统配置不统一，相关无功电压控制的装置在风电机组低电压穿越(Low

基金项目：国家自然科学基金项目(51267017)；自治区重点实验室项目(2016D03021)

Voltage Ride-though，LVRT)期间无功控制能力较弱，高低压问题交替出现，风电机组大规模脱网等[3-6]。可见，无功电压控制是风电场并网急需解决的问题之一[7-9]。

由于技术上的限制，电力系统的静态电压稳定性会影响风电并网。文献[10]提出了双馈风电机组(Doubly-fed Induction Generator，DFIG)快速变桨静态电压稳定增强控制策略，由微电网中央控制器根据风速、负荷安排设置桨距角来进行静态电压控制。文献[11-12]通过过滤集合的原对偶内点法(Primal Dual Interior Point Method，PDIPM)，调节风电场和汇集站内的多种无功设备，以多目标控制模型为指标进行优化控制。文献[13]将整个系统的静态电压稳定性(Static Voltage Stability，SVS)进行了定量分析，探索分布式电源出力对集中接入和分布式接入方式下电网 SVS 的影响。

上述文献中风电场的无功电压控制主要是针对多无功源的运行特性分析，探讨如何协调无功源来优化电压控制，但是并没有将静态电压稳定性纳入到一个整体的无功电压控制策略中。本文通过研究大规模风电场并网的静态电压稳定机理，并在现有调压手段的基础上，适时调整风电机组无功出力，升压变压器抽头以及调无功补偿装置(Static Var Compensator，SVC)，进一步提出了基于分层管理的无功功率/电压控制策略，并将该策略嵌入到风电场电压/无功自动管理平台(Voltage/Var Management Platform，VMP)。对风电场的现场试验发现，VMP 无功电压控制策略能够改善 LVRT 期间无功表现，提高风电场无功电压的稳定性。

1　风电场静态电压稳定机理

现行风电场各方面研究并不成熟，加之无功控制策略的局限性，不协调性，以及控制设备不稳定性，如何提高风电场静态电压稳定性就显得更为必要[14]。风力发电机具有间歇性，高穿透性和较低的惯性响应，这些特征常会导致风电场电压的不稳定。为研究方便，本文通过如图 1 所示的风电场等值系统模型，来对风电接入电网后的静态电压稳定机理进行研究。

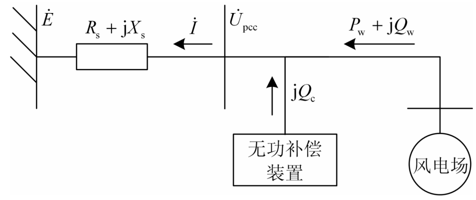


图 1　风电场并网等值模型

Fig. 1 Equivalent model of grid connected wind farm

图 1 中，$\dot{E}$ 为系统平衡点电压，$\dot{U}_{pcc}$ 为风电场并网点(Point of Common Coupling，PCC)电压，R_s+jX_s 为风电场 PCC 到系统的等效阻抗，P_w+jQ_w 为风电场输出的视在功率，jQ_c 为风电场无功补偿装置发出的无功功率，$\dot{I}$ 为风电场送出线路的电流。由图 1 可得：

$$\dot{U}_{pcc}=\dot{E}+\left(R_s+jX_s\right)\dot{I} \tag{1}$$

考虑无功补偿发出无功功率后，风电场 PCC 向电网发出的功率为(假设 $\dot{E}=E\angle 0°$，$\dot{U}_{pcc}=U_{pcc}\angle\theta$)：

$$\begin{aligned}&P_w+j\left(Q_w+Q_c\right)=\dot{U}_{pcc}\frac{\left(\overset{*}{U}_{pcc}-\overset{*}{E}\right)}{R_s-jX_s}=\\&U_{pcc}\left(\cos\theta+j\sin\theta\right)\frac{U_{pcc}\left(\cos\theta-j\sin\theta\right)-E}{R_s-jX_s}\end{aligned} \tag{2}$$

式(2)化简可得

$$\begin{cases}P_w=\dfrac{U_{pcc}E\left(X_s\sin\theta-R_s\cos\theta\right)+U_{pcc}{}^2R_s}{R_s{}^2+X_s{}^2}\\Q_w+Q_c=\dfrac{-U_{pcc}E\left(X_s\cos\theta+R_s\sin\theta\right)+U_{pcc}{}^2X_s}{R_s{}^2+X_s{}^2}\end{cases} \tag{3}$$

式(3)移项，消去θ，可得

$$\begin{aligned}&\left(P_w-\frac{U_{pcc}{}^2R_s}{R_s{}^2+X_s{}^2}\right)^2+\\&\left(Q_w+Q_c-\frac{U_{pcc}{}^2X_s}{R_s{}^2+X_s{}^2}\right)^2=\frac{U_{pcc}{}^2E^2}{R_s{}^2+X_s{}^2}\end{aligned} \tag{4}$$

等式(4)两侧均乘以$\left(R_s{}^2+X_s{}^2\right)^2$，可得

$$\begin{aligned}&\left(U_{pcc}{}^2\right)^2+\left[-2P_wR_s-2\left(Q_w+Q_c\right)X_s-E^2\right]U_{pcc}{}^2+\\&\left(R_s{}^2+X_s{}^2\right)\left[P_w{}^2+\left(Q_w+Q_c\right)^2\right]=0\end{aligned} \tag{5}$$

可求得风电场 PCC 电压$U_{pcc}=\sqrt{U'\pm U''}$，其中

$$\begin{cases}U'=\dfrac{E^2}{2}+P_wR_s+\left(Q_w+Q_c\right)X_s\\U''=\sqrt{\left(\dfrac{E^2}{2}+P_wR_s+\left(Q_w+Q_c\right)X_s\right)^2-\left(R_s{}^2+X_s{}^2\right)\left[P_w{}^2+\left(Q_w+Q_c\right)^2\right]}\end{cases} \tag{6}$$

忽略传输线路电阻 R_s，可得

$$U_{\mathrm{pcc}}=\sqrt{\frac{E^2}{2}+\left(Q_{\mathrm{w}}+Q_{\mathrm{c}}\right)X_{\mathrm{s}}\pm\sqrt{\frac{E^4}{4}-P_{\mathrm{w}}{}^2X_{\mathrm{s}}{}^2+E^2X_{\mathrm{s}}\left(Q_{\mathrm{w}}+Q_{\mathrm{c}}\right)}}\tag{7}$$

令式(7)中的基准电压为 E，基准容量为 E^2/X_{s}，无功支撑为 0 时风电场有功出力(p.u.值)P_{w} 和电压(p.u.值)U_{pcc} 的典型 PV 曲线如图 2 所示。

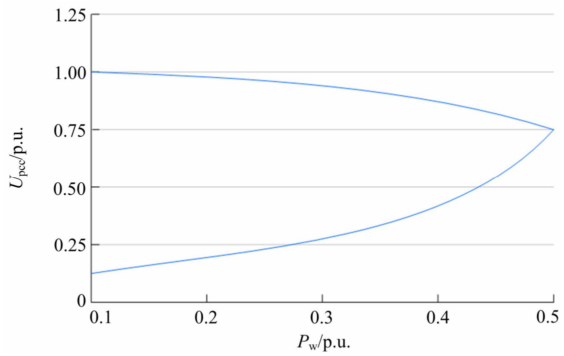


图 2 风电场群有功出力-电压典型 PV 曲线

Fig. 2 Typical PV curves of active power output-voltage for wind farm group

由图 2 可以看出，随着风电场有功出力的增加，PCC 电压逐渐降低，电压-有功灵敏度逐渐增加，微小的有功功率扰动将引起较大的电压变化，系统电压稳定性降低，在风电场出力达到 0.5 p.u.时，电压达到崩溃点。因此需要调节风电场无功出力以降低有功功率波动对系统电压稳定性的影响。

2　VMP 系统工作原理及无功控制策略研究

风电场 VMP 系统是指风电场电压/无功自动管理平台的简称，主要用来降低风电场内的集中无功补偿设备额定容量(甚至替代)，以提高风电场发电效益。目前各型风电场 VMP 的结构基本相似，本文以如图 3 所示的金风 VMP 结构进行分析。

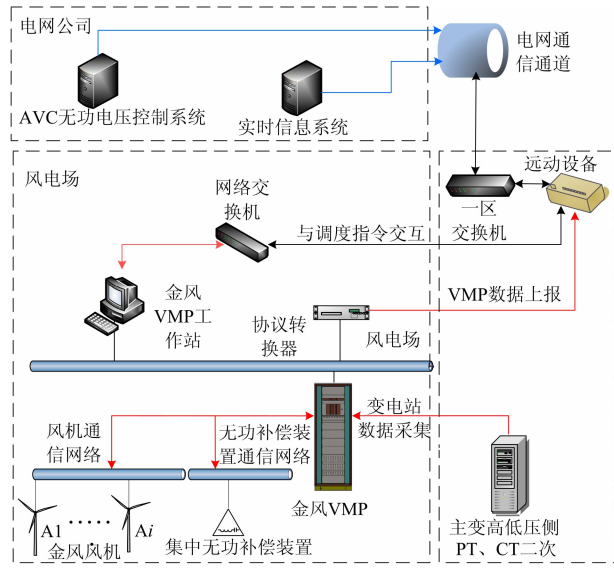


图 3 金风 VMP 系统

Fig. 3 Gold wind VMP system

由图 3 可以看出，该 VMP 系统将风电场(由 A1~Ai 个风机构成)看成为一个连续可调的无功源，根据无功电压分层协调控制原则，由电网公司自动电压控制(Automatic Voltage Control，AVC)无功电压控制系统主站经电网通信通道下发无功电压调节信号或命令，信号传至金风 VMP 工作站，经状态反馈分析计算，下达指令给金风 VMP 子站，以实现其与风机、无功补偿装置等通讯网络和变电站数据采集装置的互联通信，从而能够对系统的无功电压实时调节。

为此，各风电场应满足电网无功容量确定的基本原则[15]：对于直接接入电网的风电场，其具有的容性无功容量至少能够补偿风电场满发时场内汇集线路、主变压器的感性无功及风电场送出电路的一半感性无功之和，其具有的感性无功容量至少能够补偿风电场自身的容性充电无功功率及风电场送出线路的一半充电无功功率；风电场无功容量应结合风电场的实际接入情况，通过风电场接入电力系统无功电压来确定，在风电机组的无功容量不能满足风电场的电压调节需要时，应在风电场配置集中无功补偿装置。目前风电场调压手段主要有调节风电机组无功出力，调升压站变压器抽头以及调无功补偿装置等。通过调压控制使风场能够平抑由于风速变化或者系统中的小扰动引起的电压波动。因此，本文基于以上三种无功调压电压手段，本文提出一种新的最优无功控制策略方案如流程图 4 所示。

VMP 无功电压协调控制策略是以风电场汇集站高压侧母线电压为参考电压，若采集到的母线电压低于设定的参考电压值时，VMP 系统下发指令调节风电机组无功出力，若风电机组无功出力达到额定值，再调整升压站变压器分接头(包括主变分接头升档调节和降档调节)，若电压仍是低于参考电压值，则需要联合无功补偿设备 SVC，采用手动控制方式联合控制风电场的无功电压，最终实现风电场电无功电压的协调控制。

VMP 系统下发指令调节风电机组无功出力时，在功率因数−0.95~0.95 确定的风电机组无功容量范围内，通过改变风电机组功率因数目标值，来确定风电机组的无功控制能力。在有功出力不同，1 号

风电机组无功出力控制结果如表 1 所示，以判断风电机组无功出力能力达到额定值。

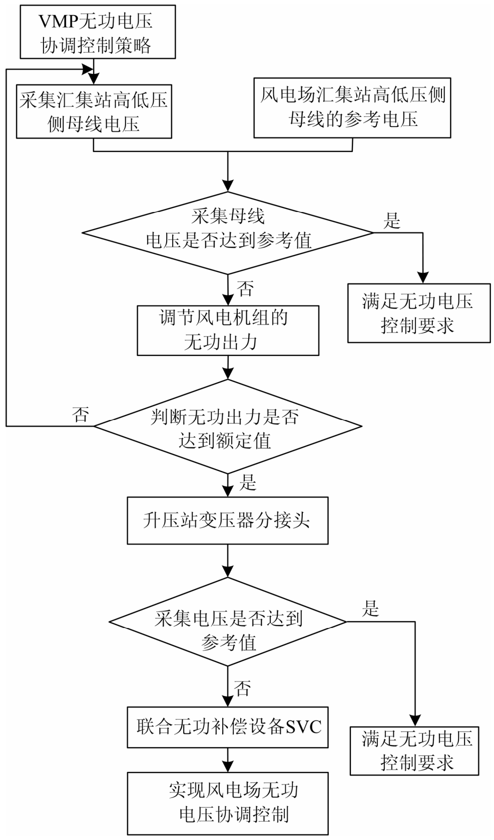


图 4　VMP 无功电压协调控制策略流程

Fig. 4 Reactive voltage coordination control strategy for VMP system

表 1　有功出力不同，1 号风电机组无功出力控制结果

Table 1 Different active power output, No. 1 wind power unit reactive power control results

有功出力	设定无功值/kvar	调整后无功值/kvar
1 100 kW	−500	−500.0
	−326	−325.0
	0	0.0
	325	326.0
	500	500.7
350 kW	500	500.7
	325	324.0
	0	0.0
	−325	−325.5
	−500	−499.9

若风电机组无功出力能力达到额定值时，则需要调整升压站变压器分接头，包括主变分接头升档和降档两个调节。首先，将主变分接头有 2 档调节至 3 档，风电场输出功率为 9.9 MW，记录 VMP 的动态响应过程。表 2 记录了升档调节前后风电场和风电机组的电气参数。

表 2　VMP 调节过程前后，风电场电气参数

Table 2 Electrical parameters of wind farm before and after VMP regulation

调节前后档位		2 档至 3 档
风电场并网点电压/kV	调节前	118.43
	调节后	118.69
风电场 35 kV 母线电压/kV	调节前	38.12
	调节后	38.4
1#风电机组	有功出力	536 kW
	调节前无功	3 kvar
	调节后无功	−107 kvar

其中 VMP 动态响应时间为 44.5 s，1 号风电机组动态响应为 45.2 s。

其次，再将主变分接头有 3 档调节至 2 档，风电场输出功率为 9.1 MW，记录 VMP 的动态响应过程(若升档调节已满足参考电压，此降档调节可省略)。表 3 记录了降档调节前后风电场和风电机组的电气参数。

表 3　VMP 调节过程前后，风电场电气参数

Table 3 Electrical parameters of wind farm before and after VMP regulation

调节前后档位		3 档至 2 档
风电场并网点电压/kV	调节前	118.31
	调节后	117.98
风电场 35 kV 母线电压/kV	调节前	38.19
	调节后	37.95
1#风电机组	有功出力	203 kW
	调节前无功	−184 kvar
	调节后无功	−103 kvar

其中 VMP 动态响应时间为 38.1 s，1 号风电机组动态响应为 41.7 s。

若调整升压站变压器分接头，电压仍是低于参考电压值，则需要联合无功补偿设备 SVC，采用手动控制方式设定联合运行的初始态，初始态下，风电场 110 kV、35 kV 母线电压在合理范围内，将主变分接头由 2 档调节至 3 档，测试联合运行条件下 SVC 的响应特性，表 4 为升档前后系统的电气参数。

表 4　档位上升测试结果

Table 4 Test results of rising taps level

实验前风电场电压/无功	110 kV 电压/kV	35 kV 母线电压/kV	装置输出无功/Mvar
	117.85	38.30	1.7
实验后风电场电压/无功	110 kV 电压/kV	35kV 母线电压/kV	装置输出无功/Mvar
	117.82	38.65	−6.8

3　VMP 系统无功控制方案现场试验

以新疆某风电场的金风 VMP 系统控制方案为例，风电场无功补偿装置测试点采集的信号为风电场主变高压侧三相电压/电流，主变低压侧三相电压，无功补偿装置三相电流，风电场 35 kV 线路#1 风电机组机端三相电压/电流。其中，风电场主变高压侧三相电压/电流，主变低压侧三相电压，无功补偿装置三相电流的采集点取自风电场 SVG 室屏柜 PT、CT 二次端子，1 号风电机组机端三相电压取自风电机组变流器网侧铜排，三相电流取自风电机组变流器网侧电缆。VMP 系统控制方案如图 5 所示。

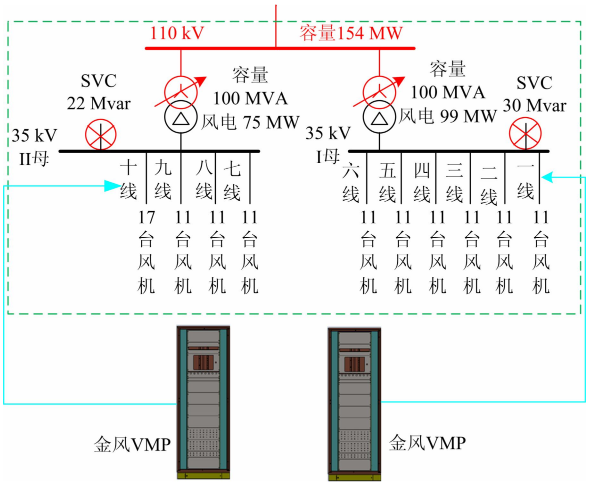


图 5　金风 VMP 系统控制方案

Fig. 5 Gold wind VMP system control scheme

图 5 中 VMP 系统控制的风电场装机容量为 174 MW，含有 116 台金风 1.5 MW 风机，2 台主变压器(简称 1 号主变)及 2 套 SVC。1 号主变容量均为 100 MVA，其高低压侧电压分别为 35 kV 与 110 kV，并由 110 kV 母线送出系统，风电场内 2 套 SVC 的容量分别为 22 Mvar 和 30 Mvar。1 号主变压器选用的是 R10 型，采用有载调压方式，并满足无功控制系统要求。实验所需要的设备与软件如表 5 和表 6 所示。

该风电场的金风 VMP 系统 1 号主变的实时运行数据结果如图 6 所示(1 min 间隔数据图)。

表 5　实验设备

Table 5 Experimental equipment

设备名称	制造商	型号	变比	精度
二次侧 5 A 电流互感器	Fluke	i5s	400 mV/A	0.5 级
数据采集系统	DEWETRON	5000	——	0.2 级
电流互感器	CHAUVIN ARNOUX	A100	1 mV/A	0.5 级

表 6　实验软件

Table 6 Experimental software

软件名称	制造商	版本号	用途
DeweSoft	DEWETRON	6.6.8	数据采集
Famos	IMC	5	数据分析

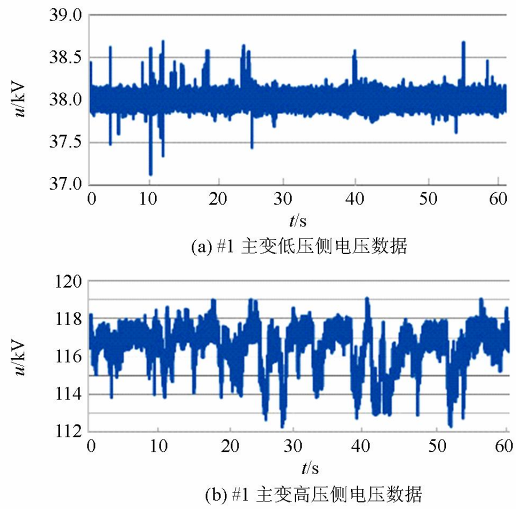


图 6　1 号主变高低压侧电压数据

Fig. 6 Data for No. 1 main transformer high and low voltage sides

由图 6(a) 1 号主变低压侧运行数据可以看出，风电场实际运行电压为 37.5~38.5 kV，围绕目标值 38 kV 微小波动，设备满足控制方案要求，风电场内电压运行稳定。同样图 6(b) 1 号主变高压侧电压以 116 kV 为中心在 113~118 kV 范围内波动，最高短时尖峰电压不超过 119 kV，最低短时尖峰电压为 111 kV，符合电网运行要求。

暂态运行结果：在 VMP 运行期间，风电场经历了一次电网电压跌落，安装金风 VMP 控制系统的风电场(共 116 台机组)电压运行稳定，没有出现电压振荡问题，并且机组全部实现低电压穿越如图 7 所示。

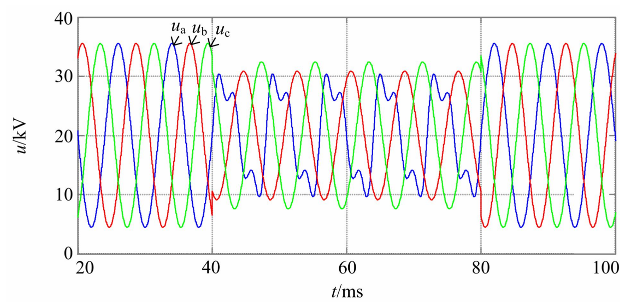


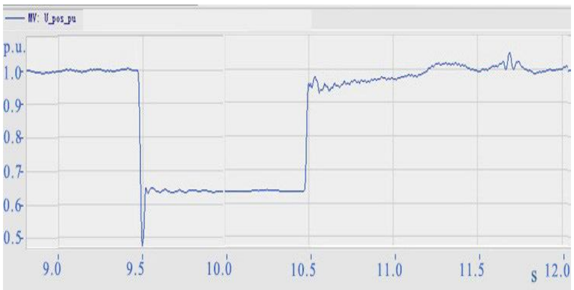
图 7　风电场电网故障期间 35 kV 电压波形

Fig. 7 35 kV voltage waves during wind power grid fault

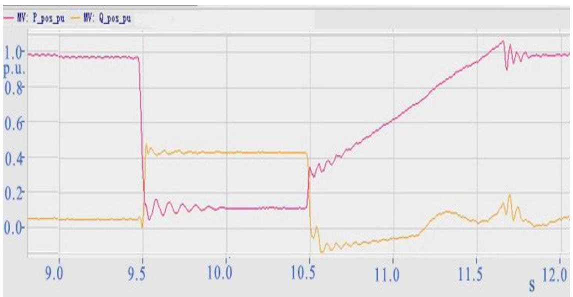
由图 7 可以看出，风电场风机在 40 ms 左右发

生低电压故障，电压有 38 kV 跌落至 30 kV 左右，VMP 系统控制风机以提供容性无功电流支撑，使得无功电压在约为 40 ms 时间内得到响应，无功电流大小根据电网电压跌落深度进行调节(为系统电压跌落标幺值的 2 倍)，最大值为 1.05 倍的额定电流。在 80 ms 系统故障清除，无功功率控制平稳，无功电压迅速恢复到稳态正常水平，转为稳态控制。

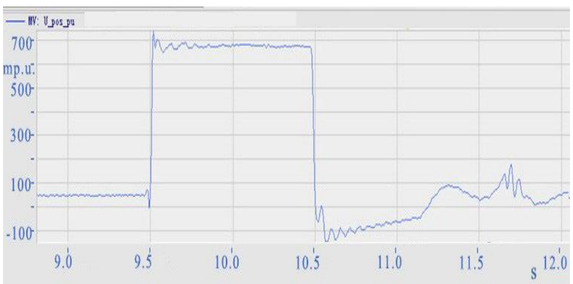
金风 VMP 已经同新疆电网公司主站通过 IEC104 协议交换器进行对接，可将无功/电压命令下发给金风 VMP，同时将 VMP 采集的风电场内部数据上报至电网公司进行反馈，从而对风电场并网点进行无功/电压进行控制。在 50%电压跌落 3 相对称时，无功电流响应局部放大如图 8 所示。



(a) 无功电压



(b) 有功功率和无功功率



(c) 无功电流

图 8 50%电压跌落三相对称时，无功电流响应

Fig. 8 50% voltage drop, the three-phase symmetry reactive current response

由图 8 可见，在三相对称，电压降低一半时，由于 VMP 系统可以控制风机提供无功电流支撑，无功电流瞬间放大 14 倍左右，以降低系统电压的跌落，使得电压能够升至 65%倍的额定电压。10.5 s 时刻电网故障清除，无功电流迅速降低，经过短暂的波动恢复至初始值，电压立刻增至目标值附近。可见 VMP 系统能充分发挥风电机组自身无功特性，改善低电压穿越期间无功表现，避免产生功率持续振荡。

4 结论

本文通过现场试验对风电场 VMP 系统无功控制进行研究，得出以下结论：

(1) 根据风电场静态电压稳定机理推导得出的并网点电压，得出有功功率扰动将引起较大的电压变化，以及调整风电场的无功出力对于稳定系统无功电压的必要性。

(2) 根据目前调压手段，本文提出的风电场 VMP 控制策略已成功应用于新疆某地区电网，该控制策略能够改善低电压穿越期间无功表现，提高风电场无功电压的稳定性，同时避免了功率振荡的产生。

(3) 采用 VMP 系统无功控制策略控制风电场并网点的电压，在暂态期间提供持续的容性无功电流支持，同时保证了暂稳态过程的无缝衔接控制，满足 IEC61400-21Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines。

参考文献

[1] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-66.
LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61-66.

[2] 崔杨, 彭龙, 仲悟之, 等. 双馈型风电场群无功分层协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4300-4307.
CUI Yang, PENG Long, ZHONG Wuzhi, et al. Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4300-4307.

[3] 周红婷, 宋玮. 计及动态无功控制影响的大规模风电汇集地区电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 13-18.
ZHOU Hongting, SONG Wei. Analysis on voltage stability in large-scale wind farms integration area considering impact of dynamic reactive power control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7):

13-18.

[4] HAO Z, YAO Z, LI S, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.

[5] 闫鹏强, 王增平, 陈振新. 考虑拓扑影响的风电场无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2016, 44(11): 1-8.
YAN Pengqiang, WANG Zengping, CHEN Zhenxin. Reactive power optimization for wind farm considering impact of topology[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 1-8.

[6] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 计及风电功率波动影响的风电场集群无功电压协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4761-4769.
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative strategy for reactive power and voltage control of wind farms cluster considering wind power fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4761-4769.

[7] ZARE M, NIKNAM T, AZIZIPANAH- ABARGHOOEE R, et al. Multi-objective probabilistic reactive power and voltage control with wind site correlations[J]. Energy, 2014, 66(4): 810-822.

[8] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.
FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.

[9] 陈继明, 祁丽志, 孙名妤, 等. 多场景下含风电机组的配电网无功优化的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 129-134.
CHEN Jiming, QI Lizhi, SUN Mingyu, et al. Reactive power optimization for distribution network with multi-scenario wind power generator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 129-134.

[10] 赵卓立, 杨苹, 蔡泽祥, 等. 含风电孤立中压微电网静态电压稳定性分析及改善策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 13-19.
ZHAO Zhuoli, YANG Ping, CAI Zexiang, et al. Analysis and improvement of steady-state voltage stability for isolated medium-voltage microgrid with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 13-19.

[11] BHASKAR MAYILVAGANAN A, SEKHAR DASH S, VENKATARAMANAN V. Grid voltage stability enhancement using photovoltaic based static synchronous compensator[J]. Journal of Computer Science, 2013, 9(3): 299-307.

[12] 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.

[13] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.
HUANG Junhui, WANG Weiyuan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.

[14] 李题印, 韩永强, 胡晓琴, 等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13.
LI Tiyin, HAN Yongqiang, HU Xiaoqin, et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.

[15] 刘皓明, 唐俏俏, 朱凌志, 等. 双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 40(24): 79-85.
LIU Haoming, TANG Qiaoqiao, ZHU Lingzhi, et al. Hierarchical control strategy of voltage and reactive power for DFIG wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 40(24): 79-85.

收稿日期：2015-10-14；　修回日期：2016-06-16

作者简介：

李自明(1989-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统及其自动化；E-mail: 1476159749@qq.com

姚秀萍(1961-)，女，客座教授，硕士生导师，高级工程师，研究方向为电网调度运行、继电保护；

王海云(1973-)，女，教授，硕士研究生导师，研究方向为可再生能源发电与并网技术。

（编辑　魏小丽）