

以并网点电压和机端电压平稳性为目标的 风电场无功电压协调控制

蔡游明¹, 李征², 蔡旭¹

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院 风力发电研究中心, 上海 200240;

2. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要: 现有的风电场无功电压控制方法均没有同时以风电场并网点和各机端电压为控制目标, 因而不能完备地解决机端电压因扰动而发生偏移越界的问题。提出一种适用于变速恒频风电机组风电场的多目标无功电压控制方法。该方法通过调节风电机组及风电场内快速无功补偿装置优化风电场并网点及场内机组端电压, 降低机组因电压越限而导致的脱网事故。以实际双馈风电机组的大型风电场为例, 在 RT-Lab 实时仿真平台上验证了所提控制方法的有效性。

关键词: 风电; 大规模风电场; 电压控制; 集电系统; 协调控制

中图分类号: TM 614; TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.024

0 引言

近年来, 随着世界能源格局的变化, 新能源发电得到了迅猛发展。作为新能源主要发电形式之一的风力发电的入网比例不断提高, 对电网的影响已经不容忽视。其中, 风电场并网的无功电压控制是受到广泛关注的问题。大型风电场由于空间分布广、风速分布差异较大且场内集电线路较长, 因而, 当并网点(PCC)电压控制在指令范围内时, 机端电压仍可能相差较大, 在某些外部扰动作用下, 会存在部分机端电压越界的现象, 影响系统安全运行。因此, 需要对机端电压进行控制。

风电场的无功电压控制可以从风电场和机组两方面来进行, 释放机组的无功能力是首先被考虑的方案。目前, 风电场大多配备了自动电压控制(AVC)系统, 可以接受上级调度指令, 同时对机组实行无功指令控制。内容主要包括风电场无功需求整定、风电场无功指令分配、风电机组无功调节这3个方面。文献[1-2]阐述了双馈风电机组无功调节的机理, 提出了针对风电场 PCC 电压的控制策略, 但由于风电场内模型进行了等值, 无法反映场内线路参数分布特性对机端电压的影响; 文献[3-4]对风电场无功需求整定进行了说明, 介绍了风电场无功指令的离线控制与在线控制模式, 但其是以风电场 PCC 电压为单一控制目标; 文献[5-8]介绍了多种以双馈机组的有功出力状态为依据进行场内无功指令分配的方法, 考虑了机组无功能力或者无功裕度, 但都没有计及机组出力对自身端电压的影响, 甚至加

大了机组端电压与额定电压的偏移量; 文献[9]所提出的风电场无功电压控制策略通过功率预测预先对风电场无功补偿设备进行调整, 再对风电机组进行实时控制, 控制目标仅仅是 PCC 电压; 文献[10]所述方法考虑了场内馈线电压问题, 以机端电压作为机组无功指令分配的上下限约束, 而没有作为控制目标, 这使得优化计算的结果中有部分机组可能运行在端电压约束边缘, 在外部扰动作用下存在电压越限的风险; 文献[11-12]研究了以风电场内所有机组端电压偏差总和最小为目标函数的无功电压优化控制方法, 该方法考虑了机端总的电压偏差, 但仍然无法保证各种运行条件下各机组电压偏差适度, 且优化计算过程耗费的计算资源量大, 难以满足以秒级为控制周期的风电场 AVC 系统的控制需求; 文献[13]提出了一种基于模型预测控制的风电场无功电压控制方法, 以 PCC 电压为控制目标, 机端电压作为控制的约束条件。

综上所述, 现有的控制方法均没有同时以 PCC 电压和各机端电压为控制目标, 因而不能完备地解决机端电压因扰动偏移越界的问题, 而风电机组对电压较为敏感, 高低电压耐受能力较弱, 尤其对高电压, 1.1 p.u. 可承受时间不超过 1 s, 可见控制机端电压的重要性。此外, 由于风电场内网集电电压属于配电电压等级, 线路阻抗中的电阻成分使得有功功率与电压不能完全解耦, 有功发电功率的波动对各机组端电压也会产生影响, 因而对风电场内机组端电压的控制还与机组有功出力相关。

本文在分析风电场内网电压分布特性的基础上, 以风电场 PCC 电压和场内风电机组端电压为控制目标, 提出了一种考虑馈线电压分布的风电场无功指令分配方法, 通过协调控制风电机组及无功补偿装置, 在满足风电场无功需求的同时优化场内馈

收稿日期: 2017-07-26; 修回日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(516771171005987)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(516771171005987)

线电压,提升机组电压安全裕度。采用实际大型风电场的参数在 RT-Lab 实时仿真平台上建立了风电场模型,以风电场实际数据作为输入,验证了所提方法的可行性。

1 风电场内网馈线电压分布特性

风电场集电系统的接线方式通常为风电场升压站低压母线采用单母线或单母线分段,每段母线上接有若干条馈线,每条馈线采用干线式连接方式链接多台风电机组,对大型风电场往往可链接 10~12 台机组;升压站高压母线经输电线路并入交流主网,如图 1 所示。

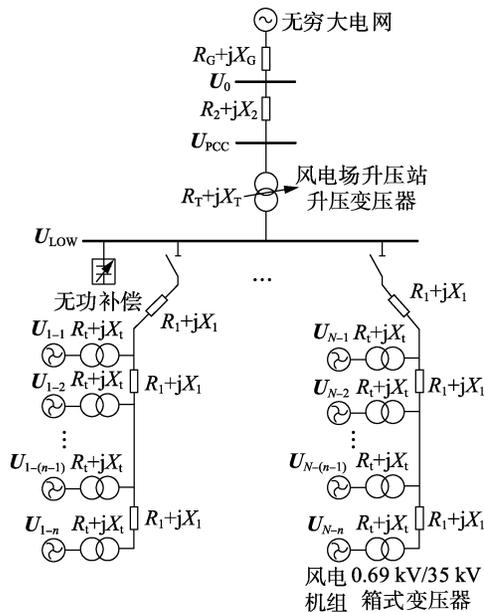


图 1 大规模风电场电能汇聚拓扑

Fig.1 Electric energy collection topology of large-scale wind farm

中国典型的大型风电场有一百多台机组,根据不同地形,每台机组之间的距离为数百米至数千米不等,因而馈线始末距离往往在数千米至数十千米之间。根据某风电场实测数据,重载时风电场升压站低压母线和馈线末端节点电压相差可达 5%^[10],因此,风电场无功电压控制在关注风电场 PCC 电压的同时也应考虑风电场内部的电压分布。

1.1 风电场 PCC 电压及其变化规律

设风电场内共有 N 条干线式连接的馈线,每条馈线上有 n 台风电机组; $Z=R_1+jX_1$ 为相邻风电机组间集电线路阻抗(假设各机组之间距离相等); $Z_1=R_1+jX_1$ 为风机箱式变压器阻抗; $Z_T=R_T+jX_T$ 为风电场升压变压器阻抗(变压器阻抗均归算至高压侧); $Z_2=R_2+jX_2$ 为风电场外送线路阻抗; $Z_G=R_G+jX_G$ 为外电网内阻抗。本文将靠近升压站的机组定义为上游机组,靠近馈线末端的机组定义为下游机组。

首先对风电场 PCC 母线电压进行分析。PCC

电压主要由电网母线电压 U_0 及风电场送出线电压降落决定。风电场内线路相较送出线路而言长度较短,故忽略风电场内部线路及变压器导致的功率损耗,根据输电线路电压降落计算^[14]可得风电场升压站高压侧母线电压为:

$$U_{PCC} = U_0 + \left[\frac{\left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n P_{a-b} \right) R_2 + \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{a-b} + \Delta Q_B + \Delta Q_{line} \right) X_2}{U_{ON}} + j \frac{\left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n P_{a-b} \right) X_2 - \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{a-b} + \Delta Q_B + \Delta Q_{line} \right) R_2}{U_{ON}} \right] \quad (1)$$

其中, U_{PCC} 为风电场 PCC 母线的电压; U_0 为无穷大电网母线电压; U_{ON} 为无穷大电网母线额定电压; P_{a-b} 为风电场第 a 条馈线第 b 台机组的有功出力; Q_{a-b} 为风电场第 a 条馈线第 b 台机组的无功出力; ΔQ_B 为风电场送出线路的充电功率, $\Delta Q_B \approx 0.5BU_{ON}^2$, B 为线路的充电电容; ΔQ_{line} 为线路阻抗消耗的无功功率, $\Delta Q_{line} \approx -X_2 P_{WF}^2 / U_{ON}^2$, P_{WF} 为风电场有功功率。

虽然高压输电线路的电抗大于电阻,但风电场的有功出力往往远大于无功出力,因此需计及风电场有功出力波动对 PCC 电压的影响。目前风电机组通常以恒定功率因数运行,在超前和滞后 0.95 功率因数内可调。根据式(1),可以得出风电场 PCC 电压的变化规律:

$$\frac{\partial U_{PCC}}{\partial P_{WF}} = \frac{R_2 + X_2 \tan \varphi}{U_{ON}} + j \frac{X_2 - R_2 \tan \varphi}{U_{ON}} \quad (2)$$

其中, φ 为风电场功率因数角。

根据式(2),风电场 PCC 电压随风电场有功出力波动而变化的规律与风电场送出线路阻抗及风电场运行功率因数相关。

若以某 100 MW 风电场实际参数为例,典型 110 kV 风电场外送线路取 100 km,根据式(1),考虑极端情况,计算风电机组以功率因数为 1 和超前或滞后 0.95 恒功率因数运行,不同有功出力时风电场 PCC 电压如图 2 所示。

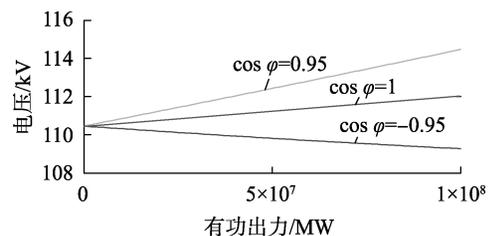


图 2 风电场升压站 PCC 电压与风电场有功出力关系

Fig.2 Relationship between PCC voltage of wind farm booster station and wind farm active power

可以看出,随着有功出力的增加,风电场 PCC 电压也会相应提高,另一方面,若风电场无功输出增加,PCC 电压也会进一步升高,而当风电场吸收无功功率大于外送线路充电功率时,PCC 电压会有所下降。在电网电压稳定的情况下,案例中的风电场 PCC 电压会在 109.5~114.5 kV 之间波动。对于风电场群而言,在多个风电场公用一条并网送出线路的情况下,其风电场 PCC 电压波动范围将更大。

1.2 机组机端电压分布规律

根据风电场 PCC 电压可以推导得到风电场升压站低压母线电压的表达式为:

$$U_{\text{LOW}} = \left\{ U_{\text{PCC}} + \left[\frac{\left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n P_{a-b} \right) R_T + \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{a-b} \right) X_T}{U_{\text{ON}}} + \frac{\left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n P_{a-b} \right) X_T - \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{a-b} \right) R_T}{U_{\text{ON}}} \right] \right\} / k_T \quad (3)$$

由于大型风电场内集电线路相较输电线路而言是电压等级在 10 kV 以上的短线路,电压损失计算可忽略电压降落横分量,同时可以忽略线路对地分布电容产生的无功功率,得各机组机端电压表达式为:

$$U_{G_{j-i}} = \left\{ U_{\text{LOW}} + \frac{\sum_{m=1}^i \left[\left(\sum_{b=m}^n P_{j-b} \right) R_1 + \left(\sum_{b=m}^n Q_{j-b} \right) X_1 \right]}{U_{\text{LN}}} + \frac{P_{j-i} R_1 + Q_{j-i} X_1}{U_{\text{LN}}} \right\} / k_i \quad (4)$$

其中, k_T 和 k_i 分别为风电场升压变压器与机组箱式变压器变比; U_{LN} 为风电场内部馈线网络额定电压。由式(3)可见,风电机组的电压水平首先取决于风电场 PCC 母线电压,当风电场 PCC 母线电压偏高或者偏低时,风电场内机组的机端电压也会出现相应的提高或者降低,因此风电场电压控制首先应该将风电场 PCC 母线电压控制在合理范围之内。

另一方面,机端电压也与机组的有功无功出力相关,出力的波动也将引起机端电压的波动。因此当风电场 PCC 母线电压被控制在合理范围之内时,机组的端电压仍可能随着集电线路上的潮流分布变化而产生偏移。机组输出的有功功率变化主要源于风速,而无功功率则取决于机组的无功功率控制策略。

此外,机组箱式变压器在运行过程中也会从外界吸收无功,根据式(4),机组机端电压与额定电压之间的偏差还取决于有功功率的大小及无功功率的流向及大小。

当机组运行在恒功率因数时,式(4)可以写为:

$$U_{G_{j-i}} = \left\{ U_{\text{LOW}} + \frac{\sum_{m=1}^i \left[\left(\sum_{b=m}^n P_{j-b} \right) R_1 + \left(\sum_{b=m}^n P_{j-b} \tan \varphi \right) X_1 \right]}{U_{\text{LN}}} + \frac{P_{j-i} R_1 + P_{j-i} \tan \varphi X_1}{U_{\text{LN}}} \right\} / k_i \quad (5)$$

则相邻 2 台机组之间的机端电压差可以表示为:

$$\Delta U = U_{G_{j-i}} - U_{G_{j-(i+1)}} = \left[\frac{- \sum_{b=i+1}^n (P_{j-b} R_1) - \sum_{b=i+1}^n (P_{j-b} \tan \varphi X_1)}{U_{\text{LN}}} + \frac{(P_{j-i} - P_{j-(i+1)}) R_1 + (P_{j-i} - P_{j-(i+1)}) \tan \varphi X_1}{U_{\text{LN}}} \right] / k_i \quad (6)$$

当机组运行在单位功率因数时,式(5)可以简化为:

$$U_{G_{j-i}} = \left[U_{\text{PCC}} / k_T + \frac{\sum_{m=1}^i \left(\sum_{b=m}^n P_{j-b} \right) R_1}{U_{\text{LN}}} + \frac{P_{j-i} R_1}{U_{\text{LN}}} \right] / k_i \quad (7)$$

相邻 2 台机组之间的机端电压差可以简化为:

$$\Delta U = U_{G_{j-i}} - U_{G_{j-(i+1)}} = \left[\frac{- \sum_{b=i+1}^n (P_{j-b} R_1)}{U_{\text{LN}}} + \frac{(P_{j-i} - P_{j-(i+1)}) R_1}{U_{\text{LN}}} \right] / k_i \quad (8)$$

根据式(8),风电场内机组机端电压差受上游机组有功总量及 2 台机组之间有功出力之差的影响。 ΔU 可正可负,越靠近上游, ΔU 的绝对值越小,即 2 台机组之间机端电压差越小。 ΔU 随着机组出力的动态过程而不断变化。

以风电场某实际工况为例,机组以 0.95 恒功率因数运行,根据风电场机组和线路参数仿真得到风电场馈线上(10 台机组)的电压分布如图 3 所示。

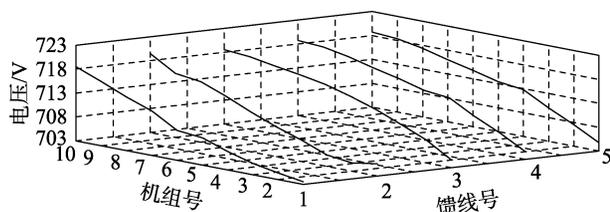


图 3 某工况下风电场内馈线电压分布

Fig.3 Feeder voltage distribution of wind farm under a certain operation condition

可见,风电场内馈线末端电压相较始端会有所提高,然而,我国《风电场接入电网技术规定》要求风电场并网点电压偏移在 -10%~10% 之间时,场内的风电机组应能正常运行。这就意味着即使 PCC 的电压在正常运行范围之内,馈线末端的风电机组运行端电压也完全有可能会超出 -10%~10% 的电压区间,从而导致机组不能正常工作或触发高电压保护动作而脱网。

2 考虑风电场内部电压分布特性的风电场无功电压协调控制

风电场无功电压控制采用分级控制,主要有 2 个层次:风电场根据上级电网电压指令进行无功功率需求整定并通过相应策略进行无功功率指令的分配,此为一级控制;风电机组接受风电场无功指令,通过变流器进行无功调节,此为二级控制。本文采取如图 4 所示的风电场无功电压控制结构。

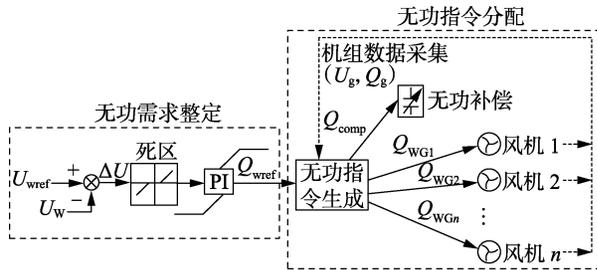


图 4 风电场无功电压控制结构

Fig.4 Structure of wind farm AVC

2.1 风电场无功功率需求 Q_{wref} 的整定

风电场既可直接接受上级下发的无功指令作为自身无功需求值,也可按照设定电压或者电压曲线进行无功整定^[15]。

采用无功指令控制模式时,上级控制通过最优潮流计算风电场的无功指令值 Q_{wref} 并下发至风电场,风电场根据相应的分配指令落实。采用电压指令控制模式时,一般首先选择 PCC 电压作为控制对象。将 PCC 参考电压与实际电压进行比较,利用比例控制器或者带死区的比例积分 (PI) 控制器得到整个风电场的无功总需求 Q_{wref} 。

根据图 4 左框可得风场无功指令 Q_{wref} 值:

$$Q_{wref} = k_p \Delta U + k_i \int \Delta U dt \quad (9)$$

高压输电线路两端的电压幅值差主要是电压降落的纵分量引起的,故:

$$\Delta U_{PCC} \approx P_w R_2 + Q_w X_2 / U_{PCC} \quad (10)$$

忽略高压输电线路中的电阻可得:

$$Q_w \approx \frac{U_{PCC}}{X_2} \Delta U_{PCC} \quad (11)$$

则 PI 调节器的 PI 系数 $k_p \approx U_{PCC} / X_2$ 。PI 调节器经比例项后产生的累积误差通过积分项消除,系数 k_i 可按照实际系统根据经验选取。

2.2 计及内网电压优化分布的无功控制策略

风电场所承担的无功需求需要通过风电场内无功补偿装置及风电机组落实,因此,需要根据一定的准则在无功补偿装置及各风电机组之间进行合理分配。无功功率分配策略需考虑无功源的边界约束条件及响应特性、控制灵敏度差异、动态容量约束、端

电压约束,形成多源协调控制策略。

从调节特性上来看,可投切的电容、电抗属于离散调节,动作时间为秒级,可以用于粗调压;静止无功补偿器 (SVC)、静止无功发生器 (SVG) 等动态无功补偿设备属于连续调节,动作时间为毫秒级,可以用于细调压。目前国内风电场建设正逐渐利用 SVC、SVG 取代可投切电容、电抗。风机采取无功功率指令控制,可以在连续域内进行调节,调节动作时间一般为毫秒级。

从可输出功率来看,风电机组可输出的无功功率边界是动态的,受到有功出力大小的限制。对于双馈机型,定子侧和网侧变流器均能发出无功功率,且均存在相应的输出极限。可按照定子侧优先的原则在机组内部进行无功分配。

由于风电场内任意机组的端电压不仅仅取决于所并入电网的电压,也和风电场内任意一台机组的有功、无功出力及线路阻抗相关,在此首先讨论风电场内任意一台机组的输出变化对其他机组端电压的影响,得到机端电压与机组无功出力之间的关系。考虑到为保证区域电压稳定,风电汇聚的上级枢纽变电站一般都装有 SVC、SVG 等快速无功补偿设备对变电站母线电压进行闭环控制,实现调度指令的快速跟踪。而在上级指令周期中,风电场的无功电压控制周期为秒级,因此在此可以近似认为 U_0 为恒定值。则根据式 (1)、式 (2) 可以导出机组端电压与风电场内各机组无功出力的相关矩阵:

$$\frac{\partial U_{G_{j-k}}}{\partial Q_{G_{j-i}}} = \begin{cases} \frac{X_2 + X_T}{U_{ON}} \frac{iX_1}{U_{LN}} & k > i \\ \frac{k_T k_1}{U_{ON}} + \frac{k_1}{U_{LN}} & k = i \\ \frac{X_2 + X_T}{U_{ON}} \frac{kX_1}{U_{LN}} & k < i \end{cases} \quad (12)$$

其中, $U_{G_{j-k}}$ 为一条馈线上第 k 台机组的机端电压; $Q_{G_{j-i}}$ 为同一馈线上第 i 台机组的无功出力; $Q_{G_{l-i}}$ 为其他馈线机组无功出力。根据西北某风电场典型参数可以计算得出式 (12) 中机组机端电压相对自身无功调节的相关系数约为相应风电场内其他机组的 10 倍。由于大型风电场通常有上百台机组,因而其他机组的输出无功不可忽略。

在控制后期内,机组的无功出力保持恒定,但有功出力随风速而波动,设在风电场无功电压控制周

期内由于有功出力的变化而产生的机端电压相对参考值产生的偏移为 $\Delta U_{G_{j-k}}$:

$$\Delta U_{G_{j-k}} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial U_{G_{j-k}}}{\partial P_{G_{j-i}}} \Delta P_{G_{j-i}} \right) \quad (13)$$

其中, $\frac{\partial U_{G_{j-k}}}{\partial P_{G_{j-i}}}$ 为机组机端电压对各机组有功出力的相关系数, 其推导过程与式 (12) 一致。该电压变化值可以通过风电场数据采集与监视控制 (SCADA) 系统实时监测, 在下一个控制指令计算过程中, 风电场 AVC 系统可按该值对机组下发无功控制指令, 实现机端电压调节:

$$\Delta U_{G_{j-k}} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial U_{G_{j-k}}}{\partial P_{G_{j-i}}} \Delta P_{G_{j-i}} \right) - \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial U_{G_{j-k}}}{\partial Q_{G_{j-i}}} \Delta Q_{G_{j-i}} \right) \quad (14)$$

一个风电场内所有机组的电压改变量均可通过式 (13) 求得。

定义式 (15) 中的系数矩阵为机组电压无功相关系数矩阵, 可根据式 (13) 计算得到, 该系数矩阵可根据实际风电场线路阻抗、电压等级通过离线计算得到。该式表达了风电场中各机组间的无功-电压变化耦合关系, 即机组的无功出力变化引起自身及其他机组电压的变化情况, 由此可进行风电场内机端电压的协调控制。

$$\begin{pmatrix} \Delta Q_{1-1} \\ \vdots \\ \Delta Q_{N-n} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial U_{1-1}}{\partial Q_{1-1}} & \cdots & \frac{\partial U_{1-1}}{\partial Q_{N-n}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial U_{N-n}}{\partial Q_{1-1}} & \cdots & \frac{\partial U_{N-n}}{\partial Q_{N-n}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta U_{1-1} \\ \vdots \\ \Delta U_{N-n} \end{pmatrix} \quad (15)$$

其次, 讨论场内的无功分配。场内机组的无功调节也影响风电场 PCC 电压。风电场获得上级下发的 PCC 母线电压参考值后, 由 AVC 系统计算整个风电场的无功指令 Q_{wref} , 再将实时获取的机组端电压数据与各自机端电压参考值 U_{iref} 之差作为目标函数进行优化计算, 即为:

$$\min f = \sum_{i=1}^n |U_i - U_{iref}| \quad (16)$$

每台机组机端电压的偏差为 $\Delta U_{j-i} = U_{iref} - U_{j-i}$, 根据式 (15) 可计算出每台机组无功的改变量 ΔQ_{j-i} , 从而得到每台机组的无功参考值 $Q_{j-i}^{ref} = Q_{j-i} + \Delta Q_{j-i}$ 。此处机端电压 (标幺值) 的参考值均取为与风电场并网点母线电压 (标幺值) 参考值相等。在分配过程中需要考虑各台风电机组的无功极限, 双馈机组的无功极限为:

$$\begin{cases} Q_{gmax} = Q_{smax} + Q_{cmax} \\ Q_{gmin} = Q_{smin} + Q_{cmin} \end{cases} \quad (17)$$

其中, Q_{smax} 、 Q_{smin} 为机组定子侧无功极限; Q_{cmax} 、 Q_{cmin} 为机组转子侧无功极限。

$$\begin{cases} Q_{smax} = -\frac{3}{2} \frac{U_s^2}{L_s \omega_s} + \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{U_s L_m i_{rmax}}{L_s} \right)^2 - P_s^2} \\ Q_{smin} = -\frac{3}{2} \frac{U_s^2}{L_s \omega_s} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{U_s L_m i_{rmax}}{L_s} \right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} Q_c \geq Q_{cmin} = -\sqrt{S_n^2 - P_c^2} \\ Q_c \leq Q_{cmax} = \sqrt{S_n^2 - P_c^2} \end{cases} \quad (19)$$

其中, U_s 为定子绕组电压; L_s 为定子电感; L_m 为激磁电感; ω_s 为电网角速度; i_{rmax} 为转子最大电流; P_s 为定子侧有功功率; S_n 为变流器额定功率; P_c 为变流器侧有功功率。

风电场 SVC、SVG 等快速无功补偿装置的无功参考值即为 $Q_{SVC/SVG}^{ref} = Q_{wref} - \sum Q_{j-i}^{ref}$ 。

根据以上无功分配策略进行无功功率分配能保证风电场 PCC 电压满足要求的情况下优化风电场内馈线电压的分布。

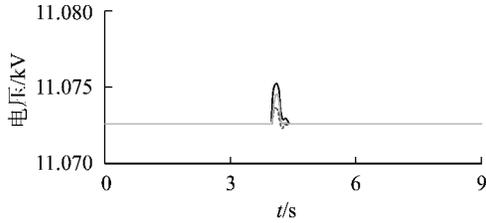
3 仿真分析

参照目前大规模风电场的实际情况, 本文建立了 100 MW 的风电场, 该风电场装有 50 台 2 MW 的双馈机组, 风电场内共有 5 条馈线, 每条馈线安装有 10 台机组, 每台风机箱式变压器容量 1 600 kV·A, 空载电流 0.8%, 阻抗电压 6.5%。机组之间距离 0.4 km, 线路型号 LGJ-185。风电场经一台容量为 100 MV·A、变比为 110 kV/35 kV 的变压器升压, 经过 100 km 长度外送线路与电网连接, 线路型号为 LGJ-240。风电场升压站低压母线装有一台容量为 20 Mvar 的 SVG。对风电场采用 3 种控制策略, 分别为本文所提出的协调控制策略和已有的 2 种常用控制方法。已有的 2 种控制方法均以风电场 PCC 电压为控制目标, 具体实现方法为: 优先利用风电场的动态无功补偿装置满足风电场的无功需求, 不足部分按照机组无功能力分配给各台机组; 优先利用机组的无功能力满足风电场的无功需求, 按照机组无功能力分配给各台机组, 不足部分由动态无功补偿装置填补。

3.1 风速扰动下 PCC 电压控制能力

首先考察控制策略对风电场 PCC 电压控制的能力。以母线电压参考值 $U_{ref} = 1.0$ p.u. 为例, 在仿真过程中对每台机组的风速设置阶跃上升 0.5 m/s。对比 3 种控制策略下风电场 PCC 母线电压情况, 如图 5 所示。

从仿真结果可以看出, 稳态情况下 3 种控制策



---本文提出的控制策略, - SVG 优先级高, · 机组优先级高

图 5 3 种控制策略下风电场 PCC 电压

Fig.5 PCC voltage of wind farm under three control strategies
略均能将母线电压控制在目标值附近,且均能在扰动发生后迅速地调整电压,保持母线电压恒定。

3.2 协调控制对机端电压的控制能力

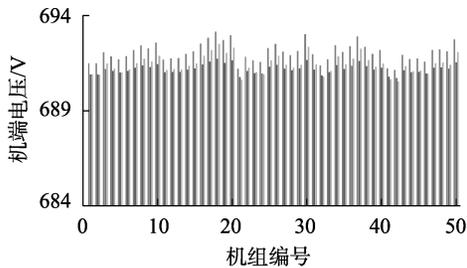
考察风电场内馈线电压分布情况。分别设置风电场 PCC 电压参考值 U_{ref} 为 1.0 p.u. 及 1.04 p.u., 在风电场高出力状态与中等出力状态下的机端电压分别如图 6、7 所示,相关参数对比如表 1、2 所示。

从仿真结果中可以看出,3 种无功控制方法均能满足风电场 PCC 电压的需求,但未将机端电压纳入控制目标的控制策略会对机组机端电压造成不利影响。

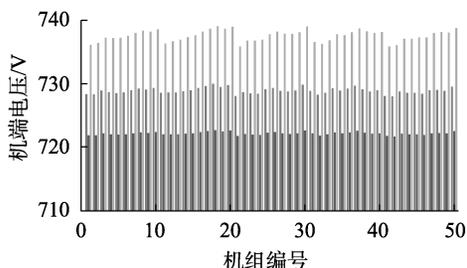
3.3 风速波动情况下协调控制能力

将实际风电场内机组秒级风速作为输入,验证所提出的协调控制策略在风速波动过程中的控制能力。仿真设置风电场 AVC 指令周期为 6 s, PCC 电压参考值为 1.0 p.u.。图 10 为风电场内一条馈线上 10 台机组的风速曲线。

图 11 为风电场 PCC 母线电压,由图可见,在机组出力随风速波动的情况下,PCC 母线电压能较精准地跟踪参考电压,主要的偏差量是由无功需求整



(a) 风电场中等出力

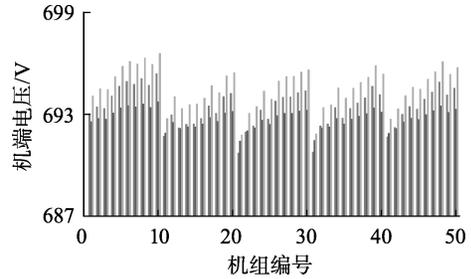


(b) 风电场高出力

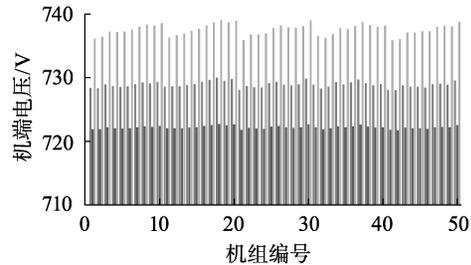
· SVG 优先级高, · 本文控制策略, · 机组优先级高

图 6 $U_{ref} = 1.0$ p.u. 时不同控制策略下机组的机端电压

Fig.6 Generator voltage for different control strategies with $U_{ref} = 1.0$ p.u.



(a) 风电场中等出力



(b) 风电场高出力

· SVG 优先级高, · 本文控制策略, · 机组优先级高

图 7 $U_{ref} = 1.04$ p.u. 时不同控制策略下机组的机端电压

Fig.7 Generator voltage for different control strategies with $U_{ref} = 1.04$ p.u.

表 1 $U_{ref} = 1.0$ p.u. 时不同控制策略下机组机端电压对比

Table 1 Comparison of generator voltage among different control strategies with $U_{ref} = 1.0$ p.u.

风电场出力	控制策略	平均值/V	标准差
中等出力	SVG 优先级高	692.1	0.70
	机组优先级高	691.4	0.69
	本文策略	691.7	0.49
高出力	SVG 优先级高	694.0	1.09
	机组优先级高	695.3	1.11
	本文策略	693.3	0.77

表 2 $U_{ref} = 1.04$ p.u. 时不同控制策略下机组机端电压对比

Table 1 Comparison of generator voltage among different control strategies with $U_{ref} = 1.04$ p.u.

风电场出力	控制策略	平均值/V	标准差
中等出力	SVG 优先级高	728.9	0.69
	机组优先级高	737.6	0.93
	本文策略	722.2	0.49
高出力	SVG 优先级高	725.4	1.08
	机组优先级高	734.3	1.07
	本文策略	719.3	0.76

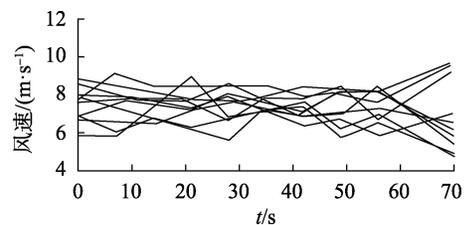


图 10 单条馈线机组风速曲线

Fig.10 Wind speed of wind turbines on one feeder

定环节的控制死区造成的。每个控制周期内电压出现小幅偏移是由控制指令周期之间指令值保持恒定,但风速不断变化导致的。

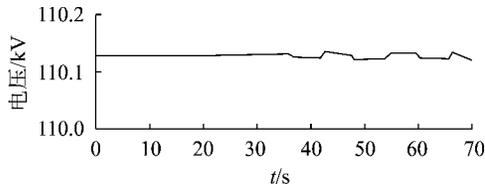


图 11 风电场 PCC 母线电压

Fig.11 PCC voltage of wind farm

图 12 为同一条馈线首端机组和末端机组机端电压。可见,整个动态过程中,首末端机组机端电压始终接近 1.0 p.u.,在指令周期内虽有小幅变化,但不会产生较大突变。

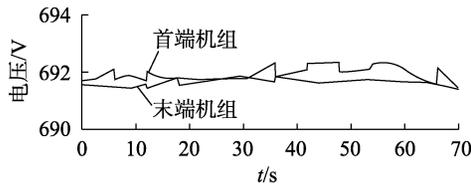


图 12 同一条馈线首、末端机组机端电压

Fig.12 Generator voltage of wind turbines at two terminals of same feeder

3.4 电网电压波动情况下协调控制效果

本文所提出的协调控制策略旨在满足风电场 PCC 电压要求的情况下改善风电场内部机组机端电压分布,在外部电网电压波动的情况下,减少风电机组因机端电压越限而导致脱网事故。

仿真设置在中等风速条件下,2 s 时外部电网电压阶跃提升,风电场 AVC 系统无法迅速对电压波动作出响应,导致风电场 PCC 电压发生阶跃,如图 13 所示。

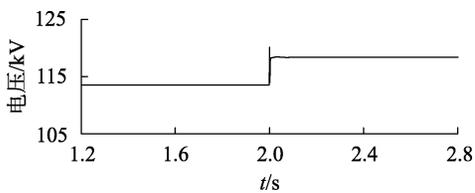


图 13 风电场 PCC 电压

Fig.13 PCC voltage of wind farm

风电场 PCC 电压抬升会使场内电压抬升,机组机端电压会超出 1.1 p.u.,从而导致机组脱网。图 14 对比了不同控制策略下发生上述扰动后风电场输出功率的情况。

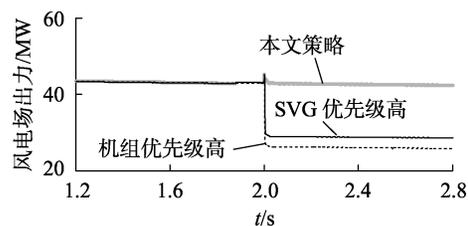


图 14 电网电压扰动后风电场出力

Fig.16 Wind farm output after voltage disturbance of power grid

从图 14 可以看出,在本文所提出的控制策略情况下发生该扰动后,风电场内机组均保持并网,电压扰动发生后风电场输出功率不变,而另外 2 种控制策略情况下均有馈线末端部分机组脱网,导致风电场输出功率减小。

综上所述,所提出的协调控制策略能在实际动态过程中对 PCC 母线电压及机组机端电压进行有效的控制。

本文提出的无功控制策略在减弱机组电压升高的同时减小了机端电压的差异,机组均处于风电场 PCC 母线电压(标么值)附近,从而提高了机组电压裕度,降低了机组因电压越限而发生事故的故障概率。

4 结论

本文分析了大规模风电场 PCC 电压及场内集电线路的电压分布规律:电网电压恒定时,风电场 PCC 电压随风电场有功出力增大而提高;离升压站电气距离越远的机组机端电压升高越多。

本文提出了一种风电场多目标无功电压控制方法,在满足风电场 PCC 电压要求的前提下,优化了风电场内的电压分布。仿真结果表明,该控制策略通过协调控制风电机组与快速无功补偿装置可以有效地维持风电场 PCC 电压,且将机组机端电压控制在指令参考值附近,减少了风电场内机组机端电压的差异,该控制方法在动态过程中同样具有理想的控制效果。

参考文献:

- [1] 乔颖,陈惠粉,鲁宗相,等. 双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):15-22.
QIAO Ying, CHEN Huifen, LU Zongxiang, et al. Design and application of automatic voltage control system in doubly-fed induction generator wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 15-22.
- [2] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):77-82.
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [3] 陈惠粉,张毅威,闵勇,等. 集群双馈风电场的分次调压控制[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):7-13.
CHEN Huifen, ZHANG Yiwei, MIN Yong, et al. Graded voltage control strategy for clustering wind farms based on doubly-fed induction generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 7-13.
- [4] 栗然,唐凡,刘英培,等. 双馈式风电场改进的恒电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(6):79-85.
LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. Improved constant voltage control strategy of DFIG based wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 79-85.
- [5] 曹军,张榕林,林国庆,等. 变速恒频双馈电机风电场电压控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(4):87-91.
CAO Jun, ZHANG Ronglin, LIN Guoqing, et al. A voltage control

- strategy for wind farms using doubly fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 87-91.
- [6] 王松岩,朱凌志,陈宁,等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 83-88.
WANG Songyan, ZHU Lingzhi, CHEN Ning, et al. A reactive power control strategy for wind farm based on hierarchical layered principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 83-88.
- [7] 赵利刚,房大中,孔祥玉,等. 综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 45-50, 55.
ZHAO Ligang, FANG Dazhong, KONG Xiangyu, et al. A strategy of reactive power control for wind farm operation using SVC and DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 45-50, 55.
- [8] 黄松柏. 考虑风电机无功调节能力的配电网有功/无功联合调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 44-49.
HUANG Songbai. Coordinated active/reactive power dispatch considering reactive-power regulation capability of wind turbine for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 44-49.
- [9] 杨桦,梁海峰,李庚银. 含双馈感应电机的风电场电压协调控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 121-126.
YANG Hua, LIANG Haifeng, LI Gengyin. A coordinated voltage control strategy for wind farm containing doubly fed induction generators[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 121-126.
- [10] 郭庆来,王彬,孙宏斌,等. 支撑大规模风电集中接入的自律协同电压控制技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 88-93.
GUO Qinglai, WANG Bin, SUN Hongbin, et al. Applied model and analysis of dispatching plan in smart grid dispatching and control system under market mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 88-93.
- [11] GUO Q, SUN H, WANG B, et al. Hierarchical automatic voltage control for integration of large-scale wind power: design and implementation[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 120(120): 234-241.
- [12] GUO Q, SUN H, LIU Y, et al. Distributed automatic voltage control framework for large-scale wind integration in China integration in China[C] // 2012 IEEE PES General Meeting. San Diego, USA: [s.n.], 2012: 1-5.
- [13] 徐峰达,郭庆来,孙宏斌,等. 基于模型预测控制理论的风电场自动电压控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 59-67.
XU Fengda, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Automatic voltage control of wind farms based on model predictive control theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 59-67.
- [14] 刘天琪,邱晓燕. 电力系统分析理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 71-73.
- [15] 陈宁,何维国,钱敏慧,等. 风电场无功电压控制系统设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36.
CHEN Ning, HE Weiguo, QIAN Minhui, et al. Design and application of reactive power control system for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 32-36.
- [16] MOURS I M E, JOOS G, ABBEY C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1178-1190.

作者简介:



蔡游明

蔡游明(1990—),男,浙江杭州人,博士研究生,研究方向为大规模风电集群以及场站功率控制(**E-mail**: cymbill@hotmail.com);

李征(1961—),女,江苏南京人,教授,博士,从事智能控制、复杂大系统、分布式电能系统控制及接入、储能系统应用方面的研究工作(**E-mail**: lizhengdh@hotmail.com);

蔡旭(1965—),男,江苏徐州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为风力发电技术、配网安全技术、大功率电力电子在电力系统中的应用、电力传动控制(**E-mail**: xucui@sjtu.edu.cn)。

Coordinated control of reactive power and voltage for wind farm aiming at voltage stability of PCC and generator terminal

CAI Youming¹, LI Zheng², CAI Xu¹

(1. Wind Power Center, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Since there is no reactive power and voltage control method of wind farm taking both the PCC (Point of Common Coupling) voltage of wind farm and the generator terminal voltage of each wind turbine as its control objects, the voltage limit violation problem of generator terminal caused by the disturbance cannot be solved completely. A multi-objective reactive power and voltage control method is proposed for variable speed wind turbine based wind farm, which optimizes the PCC voltage and generator terminal voltage by adjusting the wind turbines and the fast reactive power compensation devices in wind farm, reducing the trip-off accidents caused by the voltage limit violation of wind turbine. Taking a practical large-scale DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) based wind farm as an example, the effectiveness of the proposed control method is verified on the RT-Lab real-time simulation platform.

Key words: wind power; large-scale wind farm; voltage control; collection system; coordinated control