

DOI: 10.7500/AEPS201110004

集群双馈风电场的分次调压控制

陈惠粉, 张毅威, 闵 勇, 乔 颖, 鲁宗相

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要: 基于集群风电场间无功电压耦合较强、通信条件较差的特点, 提出以双馈风电机组为主、电容器/静止无功补偿器(SVC)为辅, 不过分依赖风电机组与风电场自动电压控制系统间通信的集群双馈风电场分次调压控制策略。事先根据电网运行状况计算得到不需实时更新的双馈风电机组的 PQ 曲线, 同步补偿无功功率以应对有功出力的变化, 并仅在电网运行状况发生大幅变化时更新 PQ 曲线; 在调节效果不够理想或 PQ 曲线未更新时, 再利用电容器/SVC 进行二次调压。通过对中国北方某地区集群风电场的仿真分析, 验证了所述控制策略可有效减少风电机组连锁脱网的发生机会, 并且其控制效果不受风电机组与风电场自动电压控制系统间通信中断的影响。

关键词: 集群风电场; 双馈感应发电机; 电压控制; 通信中断; 风电机组; 连锁脱网

0 引言

近来, 以集群形式开发的风电基地频繁发生风电机组大面积脱网事故, 浪费了绿色能源的同时, 对主网的安全性也构成了威胁^[1-2]。某节点无功分布的瞬时不合理迅速引起多个风电场的电压连锁越限是该类事故的突出特点。除风电机组不具备故障穿越能力外, 集群风电场中各风电场间电气距离较近、无功电压耦合较强、易相互影响的特点是导致此类事故的重要原因。在某节点电压越限后, 作为集群风电场的主要无功调节装置的电容器组由于投切时间间隔等原因无法快速响应, 进而使电气距离较近的其他风电场的电压越限。可见, 无功响应的快速性是保证接入弱电网的集群风电场的电压安全性的首要要求。

虽然国内大多数风电场安装有静止无功补偿器(SVC)等动态无功补偿装置, 但是 SVC 由于价格昂贵、容量较小且故障率高^[1], 大多以电容器的形式运行, 无法实现无功调节的快速性。因此, 电容器组、SVC/静止同步补偿器(STATCOM)等不适合作为集群风电场的主要无功调节装置。

目前, 双馈风电机组作为国内风电场的主流机型, 动态无功容量较大^[3-6], 同时, 双馈风电场不同于笼型风电场, 无需从系统吸收无功功率, 因此不需要

太大的无功配置。原则上, 仅利用双馈风电机组的无功能力对风电场进行电压调节就可以达到比较满意的效果。为此, 有学者提出利用双馈风电机组自身的无功调节能力, 将风电机组群综合为一个连续可控的无功源, 使其外特性上类似配有自动电压调节器(AVR)的常规电厂^[3-8]。该方法的优点是调节范围大且响应相对迅速, 不足之处是需要依赖广域测量系统(WAMS)等高速通信设备实现逆变器级控制^[9], 对通信的可靠性要求高, 一旦通信故障, 电压调节将无法进行。也有学者提出以风电场升压站为核心, 借鉴变电站综合控制系统的经验, 协调控制双馈风电机组和其他无功补偿设备^[9]。该方法的优点是不对风电机组进行逆变器级控制, 易于工程实现。但是, 该控制策略同样依赖通信的高可靠性。风电场通信条件较差且易受恶劣天气破坏, 控制策略的执行效果应不过分依赖风电机组与风电场自动电压控制(AVC)系统间通信的可靠性。另外, 国内风电场多以集群形式开发, 各风电场独立控制易引起反复调节, 有学者提出风电场群的电压协调控制策略^[10], 对接入同一地区的风电场进行集中控制, 但是该控制策略的算法计算速度过慢, 无法满足实时应用的需要。

基于集群风电场对无功响应的高要求和风电场在恶劣气候下的通信可靠性低的特点, 本文提出利用双馈风电机组作为主要无功源、不依赖风电机组与风电场 AVC 系统的高速与高可靠性通信的集群双馈风电场电压控制策略。

收稿日期: 2011-10-03; 修回日期: 2012-07-01。

国家自然科学基金资助项目(51077078); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A104); 国家重点实验室专项资金资助项目(SKLD09M08)。

1 双馈风电场无功特性分析

双馈风电机组的无功容量主要受变流器容量的制约,并随着有功输出的增大而减小。由文献[6]的仿真结果可知,双馈风电机组的无功容量在各有功出力水平下均较大,可以充分应用。

风电场典型并网结构^[11]见图1。其中,风电场装机容量为100 MVA,线路阻抗参数取值如下(基准值为1 000 MVA): $R=0.05747$, $X=0.2995$ 。

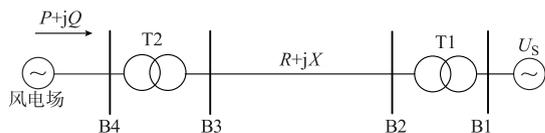


图1 风电场典型并网结构

Fig. 1 Typical structure of wind farm integration

当系统电压 U_s 分别为0.95,1.00,1.05(标么值)时,风电场在不同的有功出力下,母线B2从系统吸收的容性无功功率如图2所示。

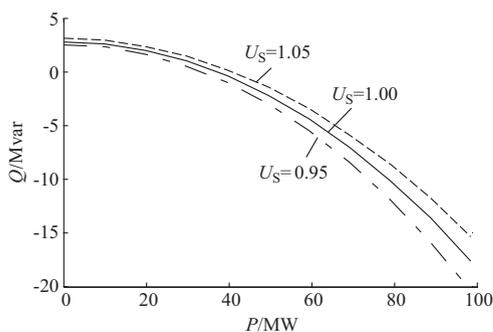


图2 风电场有功出力变化时母线B2从系统吸收的无功功率

Fig. 2 Reactive power absorbed by B2 from grid with wind farm output power change

可以看出,随着风电场有功输出的增加,B2从系统吸收的容性无功功率增大。另外,随着系统电压 U_s 的减小,B2从系统吸收的无功功率增大,但是增大的幅度较小。图2中的3条曲线几乎重合,说明系统运行方式变化不大时, PQ 特性曲线变化不大。可以取 $U_s=1.00$ 情况下的 PQ 曲线作为典型曲线,风电场的无功出力调整按照该典型曲线进行。该典型 PQ 曲线在系统运行方式变化不大时,不需改变,因此该曲线不需实时更新,可有效降低电压控制对通信可靠性的过分依赖。

若将该曲线嵌入各风电机组的控制器中,则在各风电机组有功出力随着风速发生改变的同时,无功出力也将按照该典型曲线同时改变,可以满足风电场无功响应快速性的要求。而且双馈风电机组的有功出力变化是引起风电场无功电压问题的根源,在有功出力变化的同时,利用双馈风电机组自身进

行无功补偿,真正做到了无功的就地、快速补偿。

2 分次调压的整体控制策略

集群风电场分次调压的整体控制框架如图3所示。首先电网调度定时或需要时向集群风电场下发电网运行方式及系统内各节点的电压控制目标,集群风电场AVC系统根据当前调度信息,计算得到各风电场内双馈风电机组的 PQ 曲线,将其发送到各风电机组的控制器中。双馈风电机组有功出力变化的同时,无功出力根据控制器中的 PQ 曲线相应变化,以补偿因自身有功出力变化而造成的电压波动,对风电系统的电压给予快速基础性支撑,上述过程作为一次调压;在运行过程中,若各节点的电压控制目标或者电网侧运行状况发生较大变化,则重新计算各风电场内风电机组的 PQ 曲线,并发送至各风电机组的本地控制器中,各双馈风电机组根据更新后的 PQ 曲线进行一次调压。

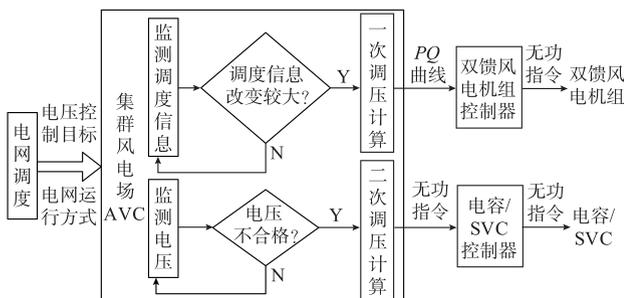


图3 集群风电场分次调压的整体控制框架

Fig. 3 General framework of graded voltage control for clustering wind farms

由于种种原因,若监测到的节点电压不在设定范围内,则认为一次调压效果不理想,此时需要更新双馈风电机组的 PQ 曲线。在双馈风电机组的 PQ 曲线更新未完成前,集群风电场AVC系统启动二次调压,利用其他无功补偿装置对系统内的电压进行调节,进一步保证系统的电压安全性。

3 一次调压

在各风电场对外等值信息已知的情况下,各风电场的 PQ 曲线可按照图2的方法分别计算得到。而国内风电场多以集群形式开发,若已知集群风电场汇集点的对外等值信息,可将集群风电场的一次调压策略整体考虑,建立以下数学模型计算所需的 PQ 曲线。

3.1 目标函数

无功电压控制的目标是保证电压的安全性,因此,以集群风电场各节点实际电压与电压目标值的偏差平方和最小为目标:

$$\min F = \sum_{i=1}^n (V_i - V_{is})^2 \quad (1)$$

式中: n 为集群风电场节点个数; V_i 和 V_{is} 分别为节点 i 的实际电压与电压目标值(由上级调度在考虑系统各节点电压安全性的基础上, 经过计算给出); F 为集群风电场的电压偏差指标。

3.2 约束条件

1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率、无功功率; V_j 分别为节点 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与 j 之间的相角差; $G_{ij} + jB_{ij}$ 为节点 i 与 j 之间的互导纳; $G_{ii} + jB_{ii}$ 为节点 i 的自导纳。

2) 控制变量约束

控制变量为各风电场双馈风电机组的无功出力, 其范围约束如下(计算方法参见文献[6]):

$$Q_{gmin} \leq Q_g \leq Q_{gmax} \quad (3)$$

式中: Q_{gmin} 、 Q_g 、 Q_{gmax} 分别为双馈风电机组的无功出力下限、实际无功出力、无功出力上限。

3) 节点电压约束

集群风电场内各节点电压必须满足电压安全性约束, 各风电场并网点电压需满足风电场的并网标准, 具体如下:

$$\begin{cases} 0.9 \leq V_i \leq 1.1 \\ 0.97 \leq V_{kPCC} \leq 1.07 \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_{kPCC} 为风电场 k 的公共连接点(PCC)电压。

3.3 模型求解

一次调压的无功优化就是寻找一组使 F 取最小值的各风电机组无功出力的组合方式。本文采用遗传算法[12]求解。遗传算法模拟自然进化过程搜索最优解, 是以适应值为依据, 通过对群体中个体施加遗传操作来实现个体结构重组的迭代过程。在这一过程中, 群体中的个体(问题的解)一代一代地被优化并逼近最优个体(最优解)。

4 二次调压

各风电场的双馈风电机组按照控制器中的 PQ 曲线进行一次调压后, 某些节点的电压依然不能满足要求, 则启动风电场二次调压, 调节手段为同一电压控制分区内的除双馈风电机组以外的其他无功调节装置。二次调压通过传统的区域电压控制方法即可实现, 由于不是本文研究的重点, 因此仅简要介绍一种调压方法。

4.1 电气距离

由快速解耦潮流的 $Q-V$ 迭代方程[13]可得各无功补偿装置对各节点电压的控制灵敏度 K :

$$K = \frac{\Delta V}{\Delta Q} = -(B'')^{-1} \quad (5)$$

式中: ΔV 为节点电压增量矩阵; ΔQ 为无功出力增量矩阵; B'' 为节点导纳矩阵的虚部。

假设共有 m 个无功源, 2 个待分区节点 i 和 j 分别对应了坐标矢量 $(K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{im})$ 和 $(K_{j1}, K_{j2}, \dots, K_{jm})$, 2 个节点之间的电气距离直接采用欧几里得距离定义[14]:

$$D_{ij} = \sqrt{|K_{i1} - K_{j1}|^2 + \dots + |K_{im} - K_{jm}|^2} \quad (6)$$

D_{ij} 越小, 表示节点 i 与 j 之间的电气距离越小; 反之亦然。

4.2 分区方法

无功电压控制的分区问题可以描述成一种典型的聚类问题[14]。聚类分析是一种研究“物以类聚”的多元统计方法, 其遵循的基本原则是: 这些对象与同一个簇中对象彼此“相似”, 与其他簇中的对象彼此“相异”。把距离小的节点归为一类, 把距离大的节点分布在不同的类中。

4.3 控制策略

将各无功补偿装置对不合格节点电压的控制灵敏度按从大到小的顺序排序, 作为无功控制的优先顺序, 以满足就地补偿的原则, 然后根据式(5)得到各无功补偿装置的无功调节量。

5 算例分析

5.1 算例系统

以中国北部某实际运行的集群风电场作为算例系统, 拓扑见图 4。风电机组总装机容量 1.45 GW, 12 个风电场就近汇集到不同的升压变电站后, 再汇集到下一个升压变电站, 最终接入电网。其中, 风电场 A2, D1, D2, E1 中的风电机组由 2 台主变压器接入系统。各风电机组在机端电压持续 100 ms 大于 1.1 或小于 0.9 之后, 保护动作切机(本文所有仿真均考虑至风电机组, 其机端电压为 690 V)。

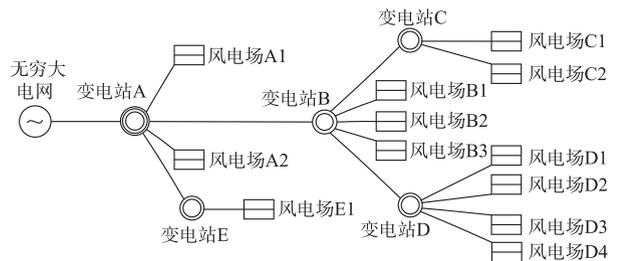


图 4 某集群风电场拓扑
Fig. 4 Topology of clustering wind farms

为计算简便,假设该地区各风电场内所有风电机组的风速相同,即出力系数相同。另外,设各节点的电压控制目标为 1,设置启动二次调压的电压临界值为 0.98 和 1.02。

5.2 一次调压的极限

假设无穷大电网电压为 1,利用双馈风电机组对集群风电场系统进行电压调节,风电场 C1 的 PCC 电压可调极限见图 5。可见,总体上,一次调压的调节范围较宽。同时,随着风电场有功出力的增大,电压可调范围变小,这是由于双馈风电机组的无功极限随着自身有功出力的增大而减小。

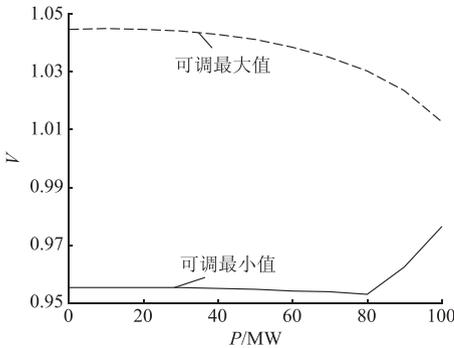


图 5 风电场 C1 的 PCC 电压可调极限
Fig. 5 Controllable range of PCC voltage of wind farm C1

5.3 一次调压的无功整定

利用遗传算法求解式(1),得到各风电机组不同有功出力水平下的无功需求后,用最小二乘法对离散的结果进行拟合,得到连续的 PQ 曲线。以风电场 D1 中 1.5 MW 风电机组为例,不同有功出力水平下的无功需求量(以发出容性无功功率为正)如图 6 所示。可以看到,风电场 D1 中的风电机组有功出力满发时,无功出力小于 500 kvar,小于此时的无功极限,一次调压可行。

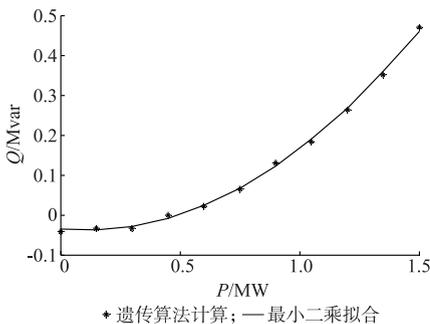


图 6 风电场 D1 中 1.5 MW 风电机组
一次调压无功整定
Fig. 6 Reactive power tuning of primary voltage control of a 1.5 MW wind turbine in wind farm D1

5.4 二次调压中分区及控制灵敏度计算

按照 4.2 节所提方法进行分区计算,算例系统可分为 4 个区,如图 7 所示,根据所在区的变电站编号依次记为 A,B,C,D 区。

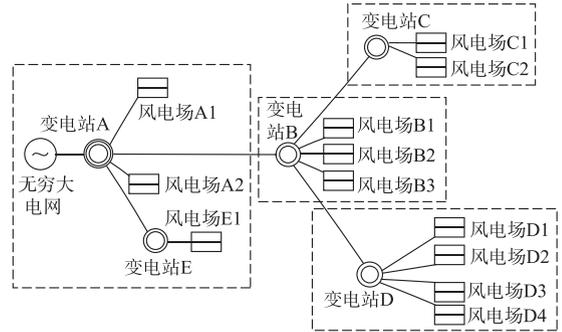


图 7 算例系统分区结果
Fig. 7 Zoning result of example system

各变电站无功补偿装置对各风电场的电压控制灵敏度如表 1 所示。可以看出,各变电站无功补偿装置对各自所接风电场的电压控制灵敏度最大,对其他区风电场的电压控制灵敏度较小,符合图 7 的分区结果。

表 1 各变电站无功补偿装置对各风电场的电压控制灵敏度

Table 1 Control sensitivity of reactive power devices of each substation to voltage of each wind farm

风电场编号	K_{T_A1}	K_{T_B}	K_{T_B1}	K_{T_B3}
A1	1.40	0.12	0.12	0.12
B1	0.12	0.34	1.55	0.34
B3	0.12	0.34	0.34	1.75

5.5 风速骤变

当风速快速减小、风电有功出力由满发变为 70% 时,由于现有的风电场电压控制不能及时跟踪风电出力的快速变化,无功出力过大,风电场 D3 出现过电压停机脱网,造成风电总出力的进一步减小,进而造成风电场 C1 过电压脱网,然后造成其他风电场连锁过电压脱网,其脱网顺序为 D3→C1→B3, C2, B1→B2, D4→D1。可以看出, A 区风电场及风电场 D2 没有出现过电压,这是由于 A 区风电场临近无穷大电网,处于强连接,而风电场 D2 距变电站 D 的电气距离很大,受该集群风电场区域出力变化的影响较小。风电场电压变化时序如图 8 所示。可以看出,同一分区内风电场的电压变化量几乎相等,这是由于同一分区内节点的电压控制灵敏度接近。

应用 5.3 节方法得到各风电场风电机组 PQ 整定曲线,将其下发至各风电机组的控制器中,作为一次调压,无功调节可同步跟踪风速的变化。图 9 为风电场在不同有功出力下,各风电场风电机组机端

电压变化情况。可以看出,无论风速如何变化,集群风电的一次调压均可以保证各风电场的电压安全,不会出现类似图 8 的风电场连锁脱网情况,这是由于按照本文的控制策略,风电机组的有功出力增大的同时,无功出力也同时相应增大。

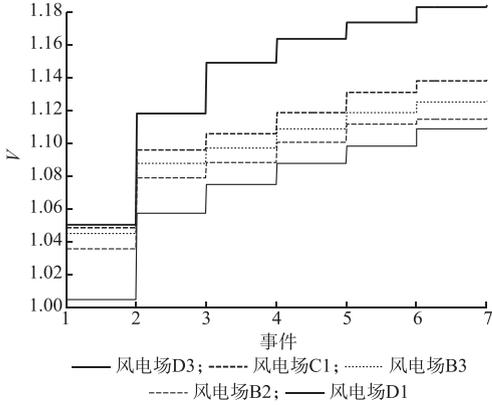


图 8 风电场电压变化时序

Fig. 8 Change sequence in time scale of wind farms' voltage

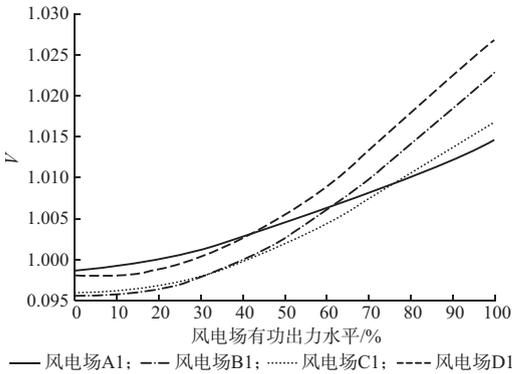


图 9 一次调压下的各风电场电压

Fig. 9 Voltage of each wind farm with primary voltage control

5.6 风电场脱网

若某风电场或线路发生故障,造成某个或某些风电场脱网,风电出力大大减小,故障切除后,现有的电压控制策略不能及时跟踪变化,造成其他风电场电压过高脱网,进而形成类似 5.5 节的风电场连锁脱网。

表 2 为风电满发的情况下,单个风电场脱网后,一次调压的效果(为简便,仅列出风电场风电机组机端电压)。表 3 为风电满发的情况下,多个风电场脱网后,一次调压的效果。可以看出,仅通过一次调压,绝大多数风电场电压都可以维持在 $[0.95, 1.05]$ 范围内,不会出现过电压现象,从而能够较好地保证风电场的电压安全性。即使外部通信故障,不能及

时进行二次调压,也不会危及集群风电场各节点的电压安全。

表 2 单个风电场脱网后的一次调压效果
Table 2 Effect of primary voltage control when single wind farm trips off grid

脱网风电场编号	U_{A1}	U_{B1}	U_{C1}	U_{D1}
A1	0.981 1	1.024 6	1.017 9	1.029 6
B1	1.019 6	0.987 7	1.021 1	1.033 8
C1	1.022 4	1.035 3	1.000 8	1.038 9
D1	1.019 1	1.029 6	1.023 2	0.981 0

表 3 多个风电场脱网后的一次调压效果
Table 3 Effect of primary voltage control when several wind farms trip off grid

脱网风电场编号	U_{A1}	U_{B1}	U_{C1}	U_{D1}
A1, A2, E1	0.982 7	1.026 4	1.019 8	1.034 2
B1, B2, B3	1.028 5	0.997 4	1.031 2	1.045 7
C1, C2	1.027 7	1.042 0	1.005 6	1.046 3
D1, D2, D3, D4	1.031 2	1.046 1	1.040 5	0.998 2

D 区风电场脱网后,本文控制策略的调节效果如图 10 所示。

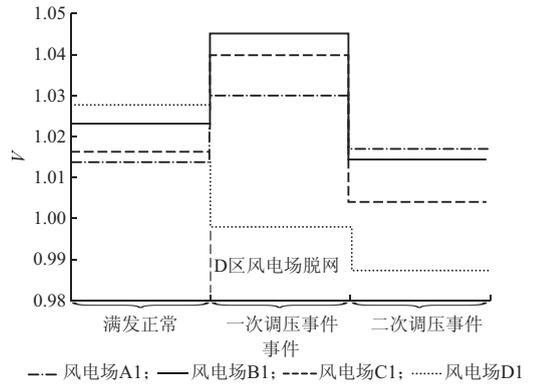


图 10 D 区风电场脱网后的调节效果
Fig. 10 Control effect when wind farms in zone D trip off grid

可以看出,D 区风电场在变电站 D 全部脱网后,在一次调压的作用下,风电场 A1, B1, C1 的电压略微升高,风电场 D1 的电压略微降低,由于部分风电场的电压值超过二次调压的设定值,因此启动二次调压,根据 4.3 节的控制策略和 5.4 节得到的控制灵敏度,对集群风电场各节点电压闭环控制。可见,二次调压后各风电场电压均能保持在 $[0.98, 1.02]$ 范围内。二次调压过程中,变电站 A, B, C, D 的无功调节量分别为 $-2.4, -2.2, -2.3, 0$ Mvar。可见,在一次调压之后,二次调压进行较小的无功功率调节,就可以使风电场电压维持在正常范围内。

5.7 控制效果对比

中国北方某地区实时风速曲线如图 11 所示,风电场双馈风电机组的切入、切出、额定风速分别为

3,25,13 m/s。

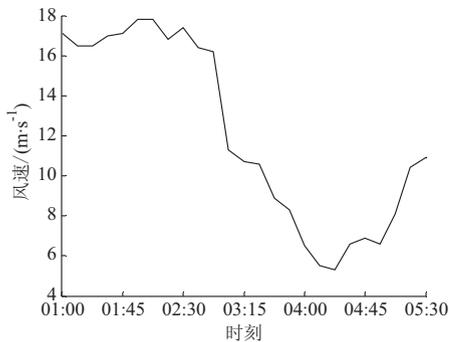


图 11 风速曲线
Fig. 11 Wind speed curve

设 02:00 时刻风电场 AVC 系统与各调节设备的通信中断;02:30 时刻,D 区风电场全部脱网。通信中断情况下现有控制策略、本文控制策略和通信正常情况下本文控制策略的风电场 C1 的电压调节效果如图 12 所示。

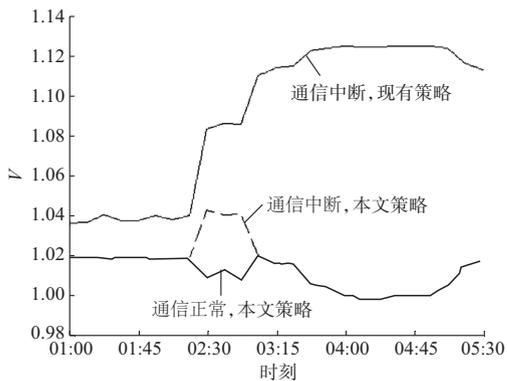


图 12 风电场 C1 的电压调节效果
Fig. 12 Voltage control effect of wind farm C1

可以看出,在现有控制策略下,风电场 C1 的电压随着 D 区风电场的脱网和风速的降低而大幅度升高,甚至超过 1.1,将进一步造成风电场 C1 内的双馈风电机组过电压脱网。这是由于随着风电机组有功出力的减少,输电与变压器的无功消耗减小,现有的控制策略高度依赖通信,在通信中断的情况下不能及时对各调节设备进行控制。而在本文所提出控制策略下,即使通信中断,风电机组仍将按照本地控制器中的 PQ 曲线进行一次调压,风电场 C1 的电压始终维持在 $[0.95, 1.05]$ 范围内。这是由于各风电场的双馈风电机组有功出力下降时,无功出力也随之下降,不会造成风电系统无功过剩和电压过高。在通信未中断情况下,本文所提出控制策略将在电压高于 1.02 后,启动二次调压。可以看到经二次调压后,风电场 C1 的电压更接近于目标电压值 1。

风电场 C1 在此期间参与一次调压的所有双馈

风电机组无功出力与参与二次调压的其他无功补偿装置的无功出力如图 13 所示。

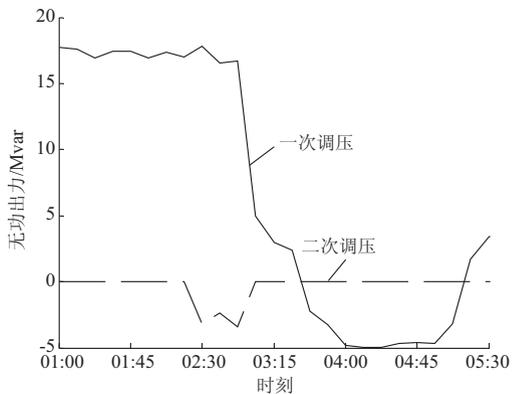


图 13 风电场 C1 的无功补偿量
Fig. 13 Compensation reactive power of wind farm C1

可以看出,一次调压的无功调节量随着风速的增大而增大,随着风速的减小而减小,而二次调压仅在电压大于 1.02 或小于 0.98 时启动,参与的无功调节量较小。

6 结语

本文提出了一种集群双馈风电场的分次调压控制策略,以适应集群风电场间无功电压强烈影响、通信可靠性低的特点。通过事先计算得到不需实时更新的双馈风电机组的 PQ 曲线,同步补偿无功功率以应对有功出力的变化,实现集群风电场的一次调压。一次调压能基本保证系统的电压安全性,在一次调压效果不够理想时,进行风电场二次调压。对中国北方地区某集群风电场进行了仿真分析,结果表明,在风速骤变、单个或多个风电场脱网、风电机组与风电场 AVC 系统的通信中断等情况下,现有的风电场电压控制方法易引起风电机组连锁脱网,而运用本文的分次调压控制策略,可有效减少风电机组连锁脱网的发生机会,改善电压的控制效果。

参考文献

- [1] 李丹,贾琳,许晓菲,等. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):41-44.
LI Dan, JIA Lin, XU Xiaofei, et al. Cause and countermeasure analysis on wind turbines' trip-off grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 41-44.
- [2] 穆钢,王健,严干贵,等. 双馈风电机组近满载工况下连锁脱网事件分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):35-40.
MU Gang, WANG Jian, YAN Gangui, et al. Cascading trip-off of doubly-fed induction generators from grid at near full-load condition in a wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 35-40.
- [3] MOURSIS M E, JOOS G, ABBEY C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind

- generation [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(3): 1178-1190.
- [4] TAPIA G, TAPIA A, OSTOLAZA J X. Proportional-integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 488-498.
- [5] KO H S, BRUEY S, JATSKEVICH J, et al. A PI control of DFIG-based wind farm for voltage regulation at remote location [C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: 1-6.
- [6] 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 double fed induction generator wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [7] 朱凌志, 陈宁, 王伟. 兼顾接入地区无功需求的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 80-85.
- ZHU Lingzhi, CHEN Ning, WANG Wei. Wind farm reactive power control strategy considering local networks demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 80-85.
- [8] 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.
- [9] 乔颖, 鲁宗相, 徐飞. 双馈风电场自动电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 96-101.
- QIAO Ying, LU Zongxiang, XU Fei. Coordinative strategy for automatic voltage control of wind farms with doubly-fed induction generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 96-101.
- [10] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场群的无功电压协调控制策略研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 78-83.
- CHEN Huifen, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Study on reactive power and voltage coordinated control strategy of wind farm group[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 78-83.
- [11] 乔嘉赓. 基于发电可靠性和电网运行安全的并网风电场规划研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [12] 崔挺, 孙元章, 徐箭, 等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 43-50.
- CUI Ting, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Reactive power optimization of power system based on improved niche genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 43-50.
- [13] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [14] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40.
- GUO Qinglai, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in Mvar control space [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40.

陈惠粉(1985—),女,通信作者,博士研究生,主要研究方向: 并网风电的运行与控制。E-mail: chf08@mails.tsinghua.edu.cn

张毅威(1961—),女,副教授,主要研究方向: 电力系统分析与控制、新能源发电。

闵勇(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向: 电力系统分析与控制、新能源发电、微电网。

(编辑 翟晶晶)

Graded Voltage Control Strategy for Clustering Wind Farms Based on Doubly-fed Induction Generators

CHEN Huifen, ZHANG Yiwei, MIN Yong, QIAO Ying, LU Zongxiang

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The characteristics of clustering wind farms are strongly coupled between reactive power and voltage of wind farms and poor communication reliability. Based on these characteristics, this paper proposes a graded voltage control strategy. In the control strategy, doubly-fed induction generators (DFIGs) are main reactive power resources because of their high reliable reactive power generation ability and capacitors/static var compensators (SVCs) are auxiliary reactive power resources. This makes the strategy independent of high speed and high reliability communication between DFIGs and wind farm automatic voltage control (AVC) system. According to the grid operation condition, the PQ curve of DFIG is calculated previously. Based on the pre-setting PQ curve, the reactive power output of DFIG is adjusted automatically to eliminate voltage fluctuation caused by change of active power output. Only when the grid operation condition changes significantly, the PQ curve need to be updated, that means the PQ curve need not be calculated in real time. When the voltage control aim is not achieved or the updating of PQ curve does not finish, capacitors/SVCs are then used to control voltage, which is called the secondary voltage control. Simulations on a real clustering wind farms in northern China is carried out. The results show that the probability of wind generators' cascading disconnection from power grid is reduced effectively with the proposed graded voltage control strategy. Communication failures between DFIGs and wind farm AVC system have no influences on control effect.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077078) and National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A104).

Key words: clustering wind farms; doubly-fed induction generator (DFIG); voltage control; communication failures; wind generators; cascading disconnection from power grid