

考虑风电场无功调节能力的无功电压 控制分区方法研究

韩平平, 张海天, 张 炎, 丁 明

(安徽省新能源利用与节能重点实验室(合肥工业大学), 合肥 230009)

摘 要: 分析双馈型风电机组(DFIG)风电场的 P - Q 容量曲线,提出同时考虑区域电气距离和区域内静态无功平衡的含风电场电力系统无功电压控制分区方法,对处理含DFIG风电场的电力系统无功控制分区提供了综合的处理方案,并结合New-England 39节点系统来验证方法的有效性。在无功控制分区过程中引入负荷被控空间的概念,采用先无功源节点聚类,后负荷节点归类的两阶段无功控制分区方法,有效解决了因风电有功出力影响其无功容量而带来的分区连通性和无功平衡问题。

关键词: 电压控制; 无功功率; 电气距离; Ward聚类; 负荷被控空间

中图分类号: TM743

文献标识码: A

0 引 言

合理有效的分区是实现电网区域无功电压自动控制的根本^[1]。随着以变速恒频风电机组为代表的新型风电场越来越多地接入电力系统,电力调度部门要求风电场既要参与系统的频率控制,也要参与电压控制^[2]。因此,研究考虑风电场无功调节能力的电力系统无功电压控制分区方法具有重要意义。

基于电气距离的电网控制分区方法,因为充分考虑了无功源的控制能力和母线电压等受控对象之间的关系(灵敏度),有利于电力系统的稳定而受到越来越多的关注^[3-9]。其中,文献[6]构造了无功源控制空间并通过聚类分析完成无功电压控制的分区。文献[9]提及分区过程中出现的连通性问题并进行了处理。

考虑风电场的无功发生能力并使其参与系统的无功电压分区控制,目前研究较少^[10]。特别需要指出的是风电具有随机性,有功出力的波动会影响机组无功调节能力,风电场参与系统无功电压分区控制时,对动态无功备用需求更大,还易出

现区域内无功不平衡的问题。为此,本文分析DFIG风电场的 P - Q 容量曲线,建立同时考虑区域电气距离和区域内静态无功平衡的无功电压控制分区模型,以文献[6]为基础,引入负荷被控空间的概念,对处理含风电场的电力系统无功电压控制分区提供综合的处理方案,并结合算例验证方法的有效性。

1 风电场无功容量计算

1.1 DFIG单机无功容量的计算

DFIG单机无功容量受多种因素的限制,常用 $P_{\text{tot}}-Q_{\text{tot}}$ 容量曲线来表示,如下图1所示。图中 P_{tot} 为DFIG输出总有功功率,由定子输出和网侧变流器RSC输出2部分组成; Q_{tot} 为DFIG输出总无功功率,由定子输出和网侧变流器(GSC)输出2部分组成; U_s 为发电机定子侧电压。通过综合考虑定子电流、转子电流、变流器容量、转子额定电压、运行状态(转差率)对DFIG输出有功、无功功率的影响绘制得到 $P_{\text{tot}}-Q_{\text{tot}}$ 容量曲线,在文献[11,12]中有详细推导过程,在此不予赘述。

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家重大研发计划“智能电网与装备”重点专项(2016YFB0900601); 国家电网公司科技项目(52094017000W)

通信作者: 韩平平(1981—),女,博士、副教授、硕士生导师,主要从事风电场接入电力系统稳定性技术方面的研究。lh021211@163.com

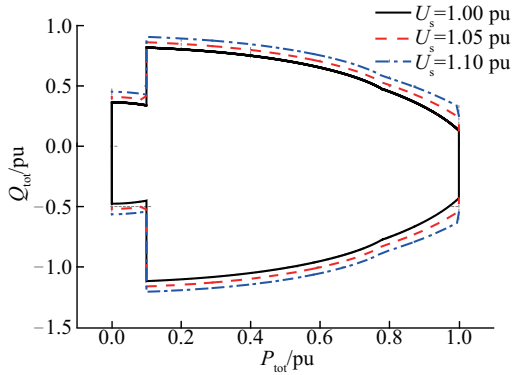


图1 不同端口电压下DFIG无功容量曲线

Fig. 1 Reactive power capability of DFIG with different PCC voltage

1.2 风电场无功容量计算

根据图1,已知单机有功功率和机端电压等信息,可以很方便的计算出其无功容量。对于大型风电场,本文采用DFIG风电场集总模型,即将风电场中所有风机等效为一台风电机组模型。假设一个DFIG风电场中安装有 n 台双馈型风电机组,整个风电场输出的总有功为:

$$Q_{WF_max} = nQ_{gi}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, Q_{WF_max} ——风电场无功容量, Mvar; Q_{gi} ——第 i 台风电机组提供的无功容量, Mvar; n ——该风电场内风机个数。

2 基于无功源控制空间和负荷被控空间的无功电压控制分区方法

2.1 无功源控制空间的构造

无功源控制空间是考虑无功源的控制能力和负荷节点之间的相互影响,构造的一个由无功源坐标系支撑的空间。假设无功源节点集合为 $G(i = 1, 2, \dots, g)$, 负荷节点集合为 $L(j = 1, 2, \dots, c)$, 负荷节点 j 在无功源控制空间下坐标的构造步骤如下:

1) PV节点准稳态物理响应的灵敏度计算。将无功源节点中的第 i 个节点设置为PQ节点, 称为观察节点, 其余节点仍保持为PV节点(若临近无功发生极限则自动转化为PQ节点), 求出无功源节点 i 对各负荷节点的电压控制灵敏度 S_{ij} 。

2) 对集合 G 中所有无功源节点都做步骤1)的操作, 求出所有无功源节点对负荷节点的电压控制

灵敏度。

负荷节点 j 可用由所有无功源构成的坐标空间向量 $\vec{l}_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{gj}]$ 来表示, 其中第 i 个坐标分量定义为:

$$x_{ij} = -\lg|s_{ij}| \quad (2)$$

式中, x_{ij} ——负荷节点到无功源节点之间的电气距离。

3) 任意2个待分区负荷节点 m 、 n 之间的电气距离可定义为:

$$D_{mn} = \sqrt{|x_{1m} - x_{1n}|^2 + \dots + |x_{gm} - x_{gn}|^2} \quad (3)$$

在无功源控制空间中, 2个对无功源具有相似或相近灵敏度的负荷节点之间的电气距离较小, 满足聚类分析的要求。

2.2 负荷被控空间的构造

若改变坐标系构造空间, 将无功源控制空间改为负荷被控空间, 将无功源节点映射到负荷被控节点, 无功源节点 k 在该坐标系下可表示为向量 $\vec{v}_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kc}]$ 。同理, 无功源在负荷被控空间中的映射可以求出无功源节点之间的电气距离。

2.3 两阶段无功电压控制分区方法

通过节点间电气距离的计算, 电力系统无功电压控制分区的图划分问题, 可转化为节点的聚类分析问题。本文采用两阶段搜索的电网分区方法。第1阶段采用无功源节点之间电气距离的Ward聚类进行无功源节点的分区^[13]。第2阶段, 在确定无功源分区方案后, 依据无功电压控制分区连通性原则和一个分区内所有节点之间最小电气距离原则进行负荷节点的分区归类。

具体步骤如下:

1) 根据无功源节点在负荷被控空间下的向量, 求取任意两无功源节点之间电气距离。对系统中所有无功源节点之间电气距离采用Ward聚类, 实现无功源的分区。

2) 对于仅与一个无功源直接连接的负荷节点直接归类到该无功源所在分区。

3) 对于与多个无功源直接连接的负荷节点, 取到无功源节点的电气距离最小者作为该负荷节点归类分区。

4) 对于与无功源节点非直接连接的负荷节点,

采用负荷节点之间的电气距离。以无功源节点为中心,根据连通性原则和负荷节点之间最小电气距离原则,扩大各分区半径,直至所有节点完成分区。

5)对于系统中的平衡节点,未能对其进行灵敏度计算,故在分区中将其归并入与其直接相连负荷节点所在分区。

3 含风电场的电力系统无功电压控制分区方法

得益于电力电子设备的快速控制特性,风电场无功调节具有快速连续可调优势。本文无功电压控制分区流程图如图2所示。风电场接入电力系统无功电压控制分区的理想状态是充分发挥风电场无功调节对分区节点电压的控制能力,但在进行负荷节点归并的过程中,特别是并入风电场所在无功电压控制分区中可能会出现以下2种情况:

1)无功源与负荷之间无法达成静态无功平衡^[14]。由于分区过程中只考虑了节点之间的电气距离测度,并未充分考虑风电场一般有功出力优先,当有功出力较大时,易出现无功容量不足的情况,无法实现本地区负荷无功需求,失去了无功电压控制分区意义。

2)风速波动引起风电出力的波动,导致对动态无功备用容量需求更大^[15],充足的无功备用容量是保证调度周期内分区电压稳定的关键因素。

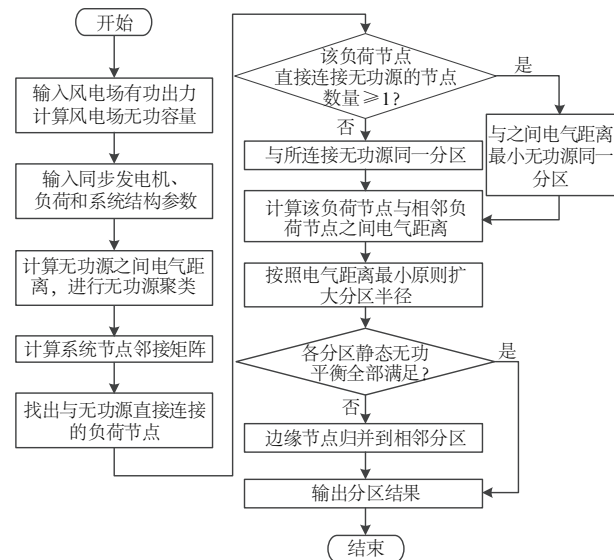


图2 含风电场的电力系统无功电压控制分区流程图

Fig. 2 Flow chart of partitioning method for reactive power/voltage control of power system with wind farms

针对上述2种情况,提出策略为分别校验分区内部静态无功平衡和动态无功备用容量。将不满足静态无功平衡的分区中处于分区边缘的负荷节点归并到相邻分区,该负荷节点的选择原则是满足归并后分区静态无功平衡;满足该节点归并后系统各分区无功储备容量最大。直到所有分区均满足静态无功平衡。若某分区所有负荷节点移动分区后仍无法满足要求,则将该分区的无功源节点归并到电气距离相距较近的另一分区,系统重新做分区。

4 算例分析

本文通过 New-England 39 节点系统对文中所述无功电压控制分区方法进行验证。

算例结构如图3所示,节点37和节点39处为风电场。节点37由200台1.5 MW双馈型风电机组组成,称为WF37;节点39由300台1.5 MW双馈型风电机组组成,称为WF39。系统各同步发电机组出力上限如表1所示。

风电场无功容量由运行状态决定,假设此时风电场运行模式为模式1:2个风电场都运行在额定转速状态,即转差率 $s = -0.2$,WF37有功功率为240 MW,WF39有功功率为360 MW。根据本文中第1节方法,可计算WF37和WF39的无功容量分别为145和215 Mvar。

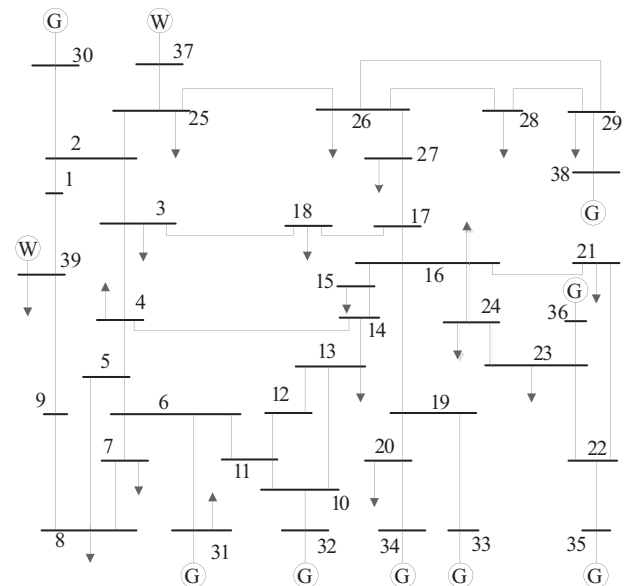


图3 含风电场的测试系统图

Fig. 3 Test system with wind farm

表1 系统各同步发电机组出力上限分布
Table 1 Power limitation of generators in system

发电机节点	P_{\max}/MW	Q_{\max}/Mvar
30	350	175
31	1146	573
32	750	375
33	732	366
34	608	304
35	750	375
36	660	330
38	930	465

以下分别采用文献[6]的分区方法和本文含风电场的电力系统无功电压控制分区方法对上述系统进行无功电压控制分区,并评估分区连通性、分区静态无功平衡和分区动态无功备用等指标。分

区结果如表 2 所示。

根据表 2,采用文献[6]的方法进行分区时,负荷节点按照电气距离进行聚类,不能保证连通性,如第 3 分区,风电场节点 WF37 由于无功容量较小,因此和节点 34,38 被分在一个区内,虽然静态无功平衡被满足,但节点 20 和 25~29 并不直接相连。另外,采用文献[6]的方法,负荷节点 1、9、39 因为电气距离接近而被分在一个区内,由无功源节点 WF39 对其进行电压控制。但 WF39 为风电场节点,算例模式下该风电场有功出力较大,导致无功容量受限,它所控制的负荷节点 1、9、39 的无功需求高于它能够提供的无功极限,无法满足静态无功平衡需求,不利于系统的电压控制。这表明,风电场的有功出力直接影响其无功容量,进而影响了分区的连通性和分区内无功平衡,传统适用于无功容量稳定的电力系统的分区方法无法实现有效的无功电压控制分区。

表2 文献[6]及本文的分区方法结果

Table 2 Partitioning results of adopting method proposed in reference[6] and this paper

分区方法	分区编号	无功源节点	负荷节点	分区内无功容量之和	分区内负荷无功之和	分区连通性校验	分区无功平衡校验	分区动态无功备用/%
文献[6]	1	(39)	(1,9,39)	215	250.0	√	×	×
	2	(31,32)	(5~8,10~13)	948	348.6	√	√	63
	3	(34,37,38)	(20,25~29)	919	297.2	×	√	68
	4	(30,33)	(2~4,14~19)	541	401.7	√	√	26
	5	(35,36)	(21~24)	705	107.4	√	√	85
本文	1	(30,37,39)	(1~3,9,17~18,25~27,39)	535	422.1	√	√	21
	2	(31,32)	(4~8,10~14)	948	532.6	√	√	44
	3	(33,34)	(19~20)	670	103	√	√	85
	4	(35,36)	(15~16,21~24)	705	292.7	√	√	58
	5	(38)	(28~29)	465	54.5	√	√	88

注:√代表校验通过;×代表不满足分区连通性、分区无功平衡或分区动态无功备用大于 0。

根据表 2,在本文所提分区方法中引入负荷被控空间,采用无功源节点之间的电气距离进行聚类,对于与无功源节点非直接连接的负荷节点,采用负荷节点之间的电气距离进行分区,系统各分区内节点均满足连通性准则;同时,对分区结果进行无功校验与调整,当风电场节点有功出力过高限制

其无功容量时,在静态无功平衡约束下,获得动态无功备用容量最大的分区结果,实现含风电场电力系统无功电压的有效控制。

改变风电场出力,得到另外 2 种风电场运行模式的组合,如表 3 所示。分别对这 2 种模式采用本文分区方法进行无功电压分区,结果见表 4。

表3 系统中风电场的运行模式组合

Table 3 Modes of wind farms in system

运行模式	风电场节点	运行状态	有功出力 P_{WF}/MW	无功容量 $Q_{WF}/Mvar$
模式2	WF37	MPPT	150	225
	WF39	MPPT	225	337
模式3	WF37	MPPT	150	225
	WF39	$S=-0.2$	360	215

根据表4,模式2下,WF37、WF39节点有功出力较小,无功裕度较大,因而(30,37)承担了(2~3,17~18,25~27)节点的无功负荷,(39)承担了(1,9,39)的负荷;而模式3下,WF39节点有功出力较大,

表4 不同风电场的运行模式下的分区结果

Table 4 Partitioning results of different modes of wind farms

风电场	运行模式	分区编号	无功源节点
WF37	模式2	1	(30,37)
		2	(31,32)
		3	(33,34)
		4	(35,36)
		5	(38)
		6	(39)
	模式3	1	(30,37,39)
		2	(31,32)
		3	(33,34)
		4	(35,36)
WF39	模式2	1	(2~3,17~18,25~27)
		2	(4~8,10~14)
		3	(19~20)
		4	(15~16,21~24)
		5	(28~29)
		6	(1,9,39)
	模式3	1	(1~3,9,17~18,25~27,39)
		2	(4~8,10~14)
		3	(19~20)
		4	(15~16,21~24)
		5	(28~29)

无功裕度较小,所以,和(30,37)分在了同一个区内,共同承担(1~3,9,17~18,25~27,39)节点的无功负荷。

结合表2、表4可知,在3种运行模式下风电场无功容量发生变化,分区结果做出了适当调整,特别是风电场WF39的分区划分进行较大调整。可见,本文采用的无功电压控制分区方法能够根据风电场实际运行状态的变化,在满足各项优化目标和约束条件下实现“在线软分区”。

5 结论

本文主要研究考虑风电场无功调节能力的电力系统无功电压控制分区方法,以充分发挥风电场无功源电压控制作用。主要结论总结如下:

1)采用先无功源节点聚类,后负荷节点归类的两阶段无功电压控制分区方法,解决了因直接采用负荷节点聚类带来的分区连通性问题。

2)风电场的有功出力直接影响其无功容量,进而影响分区的连通性和分区内无功平衡,在无功电压控制分区中需考虑是否满足静态无功平衡。

3)在对分区边缘负荷节点做分区调整时,宜从提升含风电场电力系统无功电压的控制效果出发,优先考虑有利于增大系统动态无功备用容量的方法。

[参考文献]

- [1] 陈灿旭,刘明波.无功优化分解协调计算的节点分区方法[J].电力系统保护与控制,2010,38(17):1—6.
- [1] Chen Canxu, Liu Mingbo. A bus partition approach applied to decomposition and coordination algorithm for reactive power optimization[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17):1—6.
- [2] 国家电力监管委员会.重点区域风电消纳监管报告[R].2015.
- [2] SERC. Report of regulation on wind power consumption in key areas[R]. 2015.
- [3] Lagonotte P, Sabonnadiere J C, Leost J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: Application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 479—486.
- [4] 范磊,陈珩.二级电压控制(一)[J].电力系统自动化,2000,24(11):18—21.

- [4] Fan Lei, Chen Heng. Study on secondary voltage control of power system (I) [J]. Automation of Electrical Systems, 2000, 24(11): 18—21.
- [5] 赵晋泉, 刘傅成, 邓 勇, 等. 基于映射分区的无功电压控制分区算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 36—56.
- [5] Zhao Jinquan, Liu Fucheng, Deng Yong, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on a mapping division algorithm [J]. Automation of Electrical Systems, 2010, 34(7): 36—56.
- [6] 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—54.
- [6] Guo Qinglai, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in Mvar control space [J]. Automation of Electrical Systems, 2005, 29(10): 36—54.
- [7] 胡泽春, 王锡凡, 王秀丽, 等. 用于无功优化控制分区的两层搜索方法[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 37—41.
- [7] Hu Zechun, Wang Xifan, Wang Xiuli, et al. A two-layered network partitioning approach for optimal reactive power dispatching [J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 37—41.
- [8] Eduardo C, Paul D H, Clayton B, et al. Multi-attribute partitioning of power networks based on electrical distance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4979—4987.
- [9] 邵雅宁, 唐 飞, 王 波, 等. 具有多目标量化评估特性的无功电压双阶段分区方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3768—3776.
- [9] Shao Yaning, Tang Fei, Wang Bo, et al. A dual-stage partitioning method for reactive power/voltage with multi-objective quantitative assessment [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3768—3776.
- [10] 乔 梁, 卢继平, 黄 蕙, 等. 含风电场电力系统电压控制分区方法[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 163—168.
- [10] Qiao Liang, Lu Jiping, Huang Hui, et al. Voltage control partitioning for power containing grid-connected wind farms [J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 163—168.
- [11] Santos D, Arnaltes S, Rodriguez J L. Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78 (11) : 1837—1840.
- [12] Amir A, Xavier G, Yvon B, et al. A multilevel approach for optimal participating of wind farms at reactive power balancing in transmission power system [J]. IEEE Systems Journal, 2008, 78 (11) : 1837—1840.
- [13] 刘志文, 刘明波. 基于 Ward 等值的多区域无功优化分解协调算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 63—69.
- [13] Liu Zhiwen, Liu Mingbo. A decomposition and coordination algorithm for multi-area reactive power optimization based on ward equivalent [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 63—69.
- [14] 颜 伟, 高 峰, 王 芳, 等. 考虑区域负荷无功裕度的无功电压优化分区方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 61—66.
- [14] Yan Wei, Gao Feng, Wang Fang, et al. An optimal network partitioning algorithm for reactive power and voltage control considering regional reactive power margin [J]. Automation of Electrical Systems, 2015, 39(2): 61—66.
- [15] 颜 伟, 王 芳, 唐文左, 等. 基于电源分区与短路阻抗距离的电压无功控制分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 109—115.
- [15] Yan Wei, Wang Fang, Tang Wenzuo, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on power sources clustering and short-circuit impedance distance [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 109—115.

RESEARCH ON REACTIVE POWER/VOLTAGE CONTROL PARTITIONING OF POWER SYSTEM WITH DFIG WIND FARM CONSIDERING Q CAPABILITY OF WIND FARM

Han Pingping, Zhang Haitian, Zhang Yan, Ding Ming

(Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China)

Abstract: Reasonable and effective partition is the premise to realize regional reactive power/voltage control. In this paper, the P - Q capacity curve of doubly fed induction generator (DFIG) wind farm was analyzed, and the reactive power/voltage control partitioning model of power system with wind farm was created considering both region electrical distance and static reactive power balance. For reactive power/voltage control partitioning of power system with wind farm, a comprehensive treatment method was presented and tested on New-England 39 bus system to verify its effectiveness. In the partitioning process, the concept of load controlled space was introduced, reactive power source nodes were firstly clustered, and load nodes were then classified in the second stage, effectively solving the connectivity problem caused by coupling of active power and reactive power output of wind farm.

Keywords: voltage control; reactive power; electric impedance; Ward cluster; load controlled space