

基于风力发电的新型无功补偿方案研究

胡必伟

(盐城供电公司输电运检工区, 江苏 盐城 224002)

摘要:我国已成为并网风电装机容量世界第一的国家。风电在电力系统中的比例不断扩大, 风电特性对电网的影响愈加显著。本文以双馈型风力发电机组功率关系为基础, 给出计算其无功功率极限的方法, 分析了双馈风电场对电网无功调节的作用, 提出风电对负荷就近补偿的控制策略。之后对提出方案进行仿真, 结果验证了其有效性, 表明在风电机组充分利用风能的同时, 充分发挥其无功补偿能力, 参与系统潮流的无功调节, 有效地提高电网运行的稳定性。

关键词: 风力发电; 功率限制; 无功补偿

0 引言

能源和环境问题日益突出, 可再生能源是解决这些问题的有效办法。风能作为绿色清洁的可再生能源, 应用前景广阔^[1]。在国家能源战略和沿海大开发的背景下, 江苏省特别是盐城市风力发电快速发展, 风电在电力系统中的比例不断扩大, 风电特性对电网的影响愈加显著。因此深入研究风电场与电网的相互作用成为进一步利用风电所迫切要求解决的问题。

1 风力发电发展概况

2012年6月, 我国并网风电达到5258万千瓦, 超过美国跃居世界第一。国家电网调度范围达到5026万千瓦, 成为全球风电规模最大、发展最快的电网。自2006年江苏新能源发电实现零的突破起, 至2012年9月, 江苏已有新能源发电企业102家, 装机总容量503万千瓦, 其中, 风电装机187万千瓦, 年均增长228%; 2011年风电发电量27.4亿千瓦时, 较2006年增长572倍, 年均增长188%。新能源装机总量和发电量分别占到全省的6.8%、5.7%。按照国家风电发展规划, 我省将在2020年建成全国八大千万千瓦级风电基地之一。

从已投入运行风机的情况来看, 风机平均功率继续朝着更大的方向发展, 2010年全球风机的平均功率达到1665kW。基于MW级功率机组的大型风力场投入运行, 含有不同机型的大规模风力发电场的建设日益增加。但是, 由于风能特性如随机性、

间歇性等特点, 与利用化石能源和水能的常规发电机组比较。风力发电机组的运行特性有很大的不同。此外, 并网的风电功率在电网中的比重定程度, 由此风电场风力发电机的运行状况就将直接对整个电网的安全性和可靠性产生影响。因此, 为了合理最大限度地利用可开发的风力资源, 风电并网技术急需深入研究和创新, 以提高风电并网消纳水平, 形成自主的先进控制和风电功率预测等风电场运行及优化系统, 这既能够给基于不同发电机的风电机组研发提供指导, 也可以保证大规模风电并网后, 电力系统仍能正常稳定运行^[2]。

2 风电机组无功功率极限

Q/GDW 392-2009《风电场接入电网技术规定》指出风电场在电网正常运行时必须对电网电压稳定性做出贡献。风电场为电网提供无功尤其重要。需按电力系统无功分层分区平衡的原则, 风电场首先充分利用风电机组的无功容量及其调节能力, 仅靠风电机组的无功容量不能满足系统电压调节需要的, 应在风电场集中加装适当容量的无功补偿装置, 无功补偿装置应具有自动电压调节能力。

双馈型风力发电机以其较宽的调速范围, 良好的控制策略以及经济效益等方面的优势, 引起国内外的高度重视, 已成为风力发电市场的主流机型。如我市东台、大丰等地风电场中, 双馈机组都占到很大比例。图1中的双馈型感应发电机(double-fed induction generator, DFIG), 桨叶采用变桨距调节, 定子直接与电网相连, 转子通过双向变频器与电网

连接,可实现功率的双向流动。这一类型的风力发电机的突出优点是变流器容量较小(通常为25%-40%的额定容量),既能满足风力机调速范围的要求又降低了变流器的容量,具有较强的价格优势,并且在采用适当的控制策略后它也能够满足电网对风力发电机的要求,如有功和无功的解耦控制等。

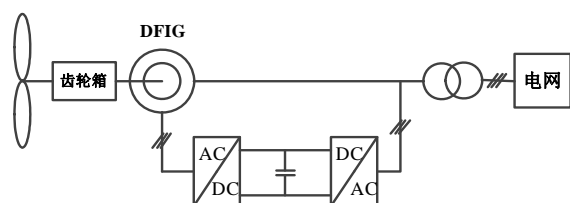


图1 双馈型风力发电系统

该系统既可亚同步运行(转子从电网吸收功率),又可超同步运行(转子向电网输出功率),现在典型的双馈型风机变速范围可以从0.7p.u.到1.2p.u.(以同步转速为基准)。定义 n_0 为双馈电机定子旋转磁场的转速(即同步转速), n_r 为转子的转速,则转差率为 $s=(n_0-n_r)/n_0$ 。从双馈电机基本方程等推导,可以得到定子(P_s)转子(P_r)回路功率关系的表达式^[3]为:

$$P_r = sP_s$$

为了能更好的利用风电机组的无功能力,对双馈风电机的无功处理能力极限作讨论分析是必要的。在定量定性分析中,双馈风机无功极限的限制要求主要有定转子最大电流限制下的无功能力和网侧变流器的无功处理能力,限于篇幅,本文只给出相应结果供下述方案设计分析参考。

2.1 最大转子电流限制

以 U_s 、 P_s 、 Q_s 分别表示双击风力发电机定子端电压,定子侧输出有功功率和无功功率,则在最大转子电流限制下定子向电网发出无功功率 $Q_{smax_out_r}$ 和从电网吸收无功功率 $Q_{smax_in_r}$ 的最大值为(正值为向电网注入容性无功)

$$Q_s \geq f_{r1}(U_s, P_s) = Q_{smax_in_r}$$

$$Q_s \leq f_{r2}(U_s, P_s) = Q_{smax_out_r}$$

2.2 定子电流(最大容量)限制

通常定子侧电流在额定状态下运行时有一定裕度,则定子电流限制下的发出和吸收无功功率最大值(以 Q_{smax_s} 表示)是对称的,表达式如下:

$$-Q_{smax_s} = -f_s(P_s) \leq Q_s \leq f_s(P_s) = Q_{smax_s}$$

综合考虑定转子侧电流限制,双馈电机的无功发生能力为

$$Q_{smax_out} = \min(Q_{smax_s}, Q_{smax_out_r})$$

$$Q_{smax_in} = \max(-Q_{smax_s}, Q_{smax_in_r})$$

2.3 网侧变换器无功功率限制

双馈电机的一大优点是电力电子器件的加入,这些电力电子器件处理能高效的有功功率的交换外,还有一定的发出和吸收无功功率的能力。则网侧变流器的无功能力 Q_{gc} 为:

$$-Q_{gcmax} = -f_{gc}(\omega_r, P_s) \leq Q_{gc} \leq f_{gc}(\omega_r, P_s) = Q_{gcmax}$$

说明在加入网侧变流器的无功功率发生能力后,双馈型风力发电机整体的无功调节能力得到了提升。

因此,综合上述各条件,总的双馈电机无功极限可以表示为

$$Q_{max_out} = Q_{smax_out} + Q_{gcmax} \quad (1)$$

$$Q_{max_in} = Q_{smax_in} - Q_{gcmax} \quad (2)$$

3 新型无功补偿方案设计

双馈风电机的优势在前文中已有详细叙述,采用相关控制策略后,实现了对电机有功功率和无功功率的解耦柔性的控制。基于上节的双馈型风力发电机功率限制,可以看出双馈风电机组除了在系统中作为有功电源向系统提供一定的有功功率的同时,也可以成为系统中重要的无功电源,从而在电网电能质量,如控制点功率因数,接入点电压支撑等方面发挥积极的作用。本小节考虑充分利用双馈型风力发电机组成的风电场的无功能力,对风电场接入的地区电网中临近的有一定功率因数的用户,即无功功率进行补偿,从而改善上游电源供电的电能质量,减少功率损耗^[4]。

从风力发电技术开发的初衷来看,双馈型风电场的主要控制目的是根据最大风能捕获等策略来进行有功功率的获取和输出,风电场中的各风机根据实际风速大小按一定转速控制规律由各自的控制系

统实现,而无功功率则由风场的监控系统统一控制。

并网风电场对电网接入点电压的影响与电网的强弱直接相关,电网的强弱是一个相对的概念。假设电网在接入点的短路容量为 S_{sc} ,对于额定功率为 P 的风电场,比值 $R_{sc}=S_{sc}/P$ 是衡量电网强弱的一个指标。如果 $R_{sc} > 20$,所连电网通常视为强电网^[5]。

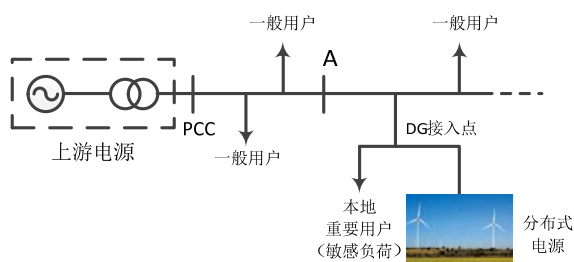


图2 典型的含风电场的配电网结构图

整体的控制方案如图3所示。电网调度系统通过风电场整体的运行情况和上级电网传达的无功需求,向风电场监控系统下达无功功率参考命令。

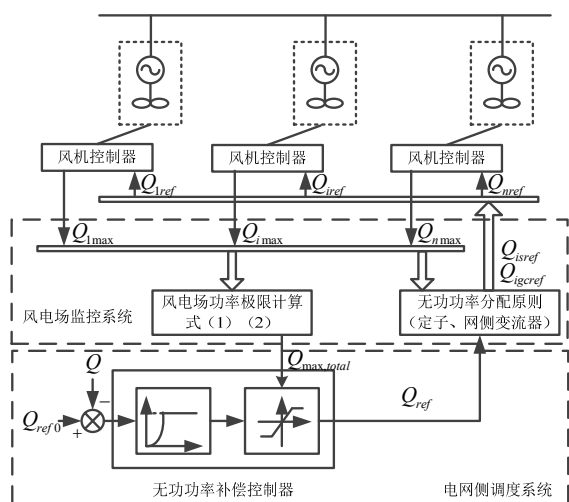


图3 调节功率因数的无功补偿整体控制框图

双馈电机风电场中每台风电机组的控制系统实时计算出该机组动态无功发生极限 Q_{imax} 并通过通讯方式传送给风场的监控系统。监控系统根据每台机组的无功发生能力,计算出整个风场的无功发生极限 $Q_{max, total}$,通过通讯的方式传送给上一级电网调度系统。电网的调度系统设计一个无功补偿控制器,通过检测无功控制点处实际的无功功率,并与参考值比较,经过调节器和限幅器输出风电场无功功率参考值 (Q_{ref}),由于限幅器的存在,可以保证该参考值始终在风电场的无功发生能力之内。该参考值送到风电场的监控系统,监控系统按一定规则在各个风电机组之间分配无功发生任务,即每台

机组的无功功率参考值 Q_{iref} 。机组的控制系统根据无功功率参考值按一定规则在定子和网侧变换器之间进行无功分配,并控制发电机组发出所需的无功功率。

各风力发电机组间的无功功率分配原则为

$$Q_{iref} = \frac{Q_{i\max}}{Q_{\max, total}} Q_{ref}$$

这一原则在不超出各个风力发电机组无功功率发生极限的基础上,充分发挥了其无功发生能力。这一级分配在风电场监控系统中完成。

4 实例及分析

图4为典型的含有风电场及负荷的配电网模型。

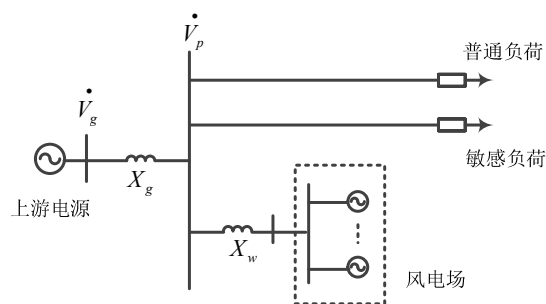


图4 含有风电场的配电网仿真拓扑图

其中风电场由6台额定有功功率1.5MW双馈型风力发电机组组成,基准功率取10MVA。风机接入35kV配网,其中含有两种等级的负荷(均采用恒定阻抗模型):普通负荷(common load)有功功率20MW,无功功率4.06Mvar(功率因数0.98);敏感负荷(sensitive load)有功功率5MW,无功功率2.42Mvar(功率因数0.9)。出于安全和稳定性考虑,理论计算所得的无功功率极限不适合直接作为无功功率能力参考限值,而乘一个小于1的安全系数,本仿真中取0.9。

此仿真实例中取配网电压等级35kV,综合考虑含有风电场的系统短路容量250MVA,则此时电网相对风电场而言为强电网,宜采用控制无功功率节点功率因数的补偿策略。实例中双馈型风电机组运行风况从11m/s增加到14m/s,则风机转子转速及有功出力等相应改变,仿真数据图如图5、6。

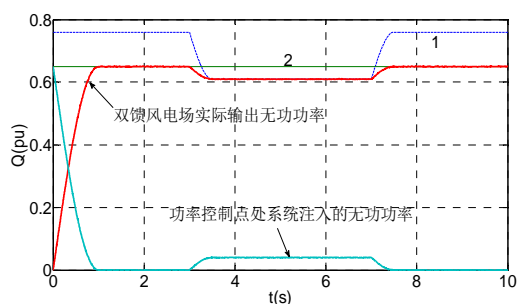


图 5 基于控制功率因数的无功补偿图

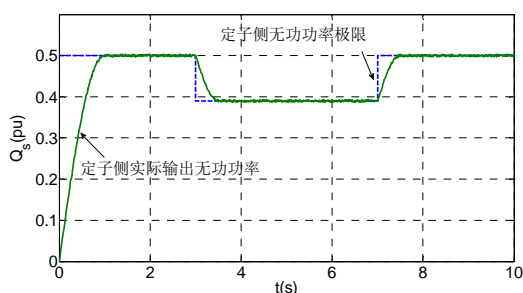


图 6 双馈发电机定子侧无功功率

在风速为 11m/s 时，此时的无功功率极限大于负荷需求，启动补偿策略后，双馈风电场可以完全供给负载的无功功率，无功功率控制点的功率因数达到 1。分别从定子侧和网侧变流器看，定子侧发出无功功率的能力不能完全满足负荷需要，网侧变流器须同时参与无功功率调节，但未达到其极限，还有一定裕量。当风速增大到 14m/s 时，风电场输出有功功率也达到额定值，双馈风电场提供的无功功率能力减小。此时，风电场整体无功功率供给能力小于负荷需要，即风电场不能完全补偿控制点处的无功功率，控制点功率因数提高但不能达到最优。

采用正常运行时以调节功率控制节点功率因数的无功补偿策略后的，双馈风电场功率输出曲线如图 5。虚线 1 为随风速变化，发电机转速变化及有功输出改变的情况下，计算得到的双馈型风力发电机的无功出力极限（考虑了裕量系数 0.9）。实线

2 为负荷所需无功功率值。启动了基于控制点功率因数的无功补偿策略后，实际的双馈风电场无功出力曲线和经双馈电机补偿后，系统还需向控制点注入的无功功率曲线都已在图 6 中标明。

5 结论

双馈型风力发电机是目前并网风力发电的主流机型，本文以双馈型风力发电机为研究对象以双馈型风力发电机功率关系为基础，提出一种综合考虑运行稳定性，定转子电流限制的双馈风机风力发电系统无功极限的计算方法，同时加入网侧变换器的无功功率发生能力，得到系统整体的无功功率极限。基于功率限制，以充分利用双馈机组无功功率能力提出新型的强电网下控制无功功率节点功率因数。对相应控制策略进行仿真，结果验证了本文所提基于功率限制的补偿控制策略的有效性，表明在双馈型风力发电机变速恒频运行极大限度利用风能的同时，充分发挥其无功补偿能力，参与系统潮流的无功调节，有效地提高电网运行的稳定性。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国可再生能源法. 2005.
- [2] 可再生能源中长期发展规划. 中国发展与改革委员会, 2007.
- [3] 高景德,王祥晰,李发海.交流电机及其系统的分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [4] Taylor C W. 电力系统电压稳定 Power Systems Voltage stability[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [5] 郎永强,张学广,徐殿国.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.

作者简介：

胡必伟（1987—），男，江苏盐城人，盐城供电公司输电运检工区输电运检工，E-mail: hubiwei@gmail.com。