



系统之间的矛盾.

1 大规模风电并网对电网电能质量的影响因素及应对措施

1.1 电压波动和闪变

电压波动的危害表现在照明灯光闪烁、电视机画面质量下降、电动机转速不均匀和影响电子仪器、计算机、自动控制设备的正常工况等^[1].

1.1.1 产生原因

(1) 功率波动. 风电机组并网运行引起的电压波动归根结底是由风速的变动引起. 风电机组的机械功率为 $P = 1/2 \rho C_p(\lambda, \beta) A v^3$, 由于风速 v 的变化由自然条件决定, 随机性较强, 且功率与风速的三次方近似呈正比, 因此当风速快速变化时, 并网风电机组的输出功率将出现波动, 有功电流和无功电流随之变化, 从而引起电网电压波动和闪变^[2].

(2) 公共连接点短路比. 并网风电机组公共连接点短路比和电网线路比 X/R 也是影响风电机组引起电压波动和闪变的重要因素. 合适的 X/R 比可以使有功功率引起的电压波动被无功功率引起的电压波动补偿掉, 从而使整个平均闪变值有所减轻. 研究表明, 当线路 X/R 比对应的线路阻抗角为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 时, 并网风电机组引起的电压波动和闪变最小.

(3) 塔影效应. 在并网风电机组持续运行过程中, 由于受塔影效应、偏航误差和风剪切等因素的影响, 风电机组在叶轮旋转一周的过程中产生的转矩不稳定, 转矩波动将造成风电机组输出功率的波动, 并且这些波动随湍流强度的增加而增加.

并网风电机组不仅在持续运行过程中产生电压波动和闪变, 而且在启动、停止和发电机切换过程中也会产生电压波动和闪变^[3]. 切换操作引起功率波动, 并进一步引起风电机组端点及其他相邻节点的电压波动和闪变.

1.1.2 应对措施

现有研究分别从变速风机控制、无功补偿、有功和无功结合等方面提出对风电并网电压波动和闪变的抑制策略.

(1) 变速风机控制策略. 杨颀, 纪志成在文献[4]中建立将遗传算法应用于考虑风剪切和塔影效应对风速影响的风速模型上并进行PID控制参数优化的闪变抑制器, 研究结果表明可有效抑制双馈风力机引起的电压闪变.

但是对变速风机本身的控制只能在一定程度上减小风机输出功率的波动, 且不能完全消除闪变对电网电能质量的影响.

(2) 无功补偿策略. 戴成昕在文献[5]中利用串联型电压补偿装置, 采用完全补偿法的控制策略进行电压补偿. 在传统的比例积分控制基础上结合重复控制, 研究结果表明提高了稳态控制的精度和动静态性能.

在并网风电场输出端并联无功补偿设备, 能够消除并网风电场对电力系统无功功率变化的影响, 对电压的波动进行补偿. 然而对于随风能自然波动的有功功率引起的电压波动并不能产生抑制作用, 因此仅对风电场进行无功补偿是无法有效抑制风电并网带来的电压闪变.

(3) 有功无功结合策略. 江海敏在文献[6]中采用超级电容器为储能元件, 功率调节系统采用电压源型变流器双向DC/DC变换器结构, 将低通滤波器滤过的风功率作为控制目标, 建立储能系统的控制策略, 实现对有功功率的追踪.

Virtanen A 与 Tuusa H 在文献[7]中对传统STATCOM与带有储能装置的STATCOM装置在中低压系统中的补偿作用进行了比较. 研究结果表明: 传统STATCOM与带有储能装置的STATCOM的补偿作用相比, 带有储能设备的补偿装置在电压校正、闪变抑制、平滑供电电流波形等方面表现更为优异, 且其桥式电路的额定容量小于传统STATCOM.

有功和无功结合对风电并网电压波动和闪变抑制的方法能够有效抑制风电并网引起的电压波动和闪变, 但存在制造成本高、检测算法复杂等缺点.

变速风机控制、无功补偿、有功和无功结合等策略能够在一定程度上有效抑制风电并网引起的电压波动和闪变, 但依然存在不能从根本上消除电压波动和闪变对电网电能质量影响的弊端, 并且在实际应用中会受到治理成本的制约.

1.2 谐波

谐波注入电网, 会增加输电线路和变压器的损耗, 加速设备的绝缘老化, 缩短使用寿命甚至使设备损坏报废; 易引起电网局部并联或串联谐振, 使谐波进一步放大; 还会影响线路中的保护元件, 使保护装置误动作, 电气测量仪表不准确^[8].

1.2.1 产生原因

风力机自身的电力电子控制装置是谐波的主要来源. 变速风电机组并网后变流器始终处于工作状态, 由于变流器的开关频率是不固定的, 运用PWM

开关变流器和滤波器能够使谐波畸变最小化.但若电力电子装置的开关频率恰好在产生谐波的范围,则产生严重的谐波问题.谐波电流大小与输出功率基本呈线性关系,即与风速大小有关^[9].谐波干扰的程度取决于变流器的设计结构及其滤波装置状况,同时与电网的短路容量有关^[10].采用新技术的逆变器低频谐波分量较小,但会产生一定的高频间谐波分量,由于频率较高,容易去除.

此外,风机的并联补偿电容器可能和线路电抗发生谐振,将对谐波起到严重的放大作用.

1.2.3 应对措施

治理谐波有以下两种常见方法:一是改造电路变流设备以抑制或降低谐波源所产生的谐波量,适用受限于作为主要谐波源的装置;另一种是对电网谐波进行集中补偿,使电源只输出有功电流,适用范围更广,通常应用无源电力滤波器和有源电力滤波器进行谐波治理^[11].

(1) 无源滤波器.无源滤波器作为传统的谐波抑制方式而言造价低廉,易于设计,但由于其受系统参数变化影响较大容易导致串并联谐振,且只能滤除特定某几阶次谐波并可能会放大其他次的谐波分量,可能会产生过载从而导致设备损坏.因此正逐渐被有源电力滤波器和混合型滤波器取代^[12].

(2) 有源电力滤波器.有源电力滤波器具有较好的自适应和快速响应能力,对谐波状态不断变化的情况能实现动态补偿.该装置不需要储能元件即可实现无功补偿,而在补偿谐波时所需要的储能元件容量也相对较小,且不易受电网阻抗变化的影响^[13].

但采用有源电力滤波器进行谐波抑制的控制电路多为模拟电路,线路结构较为复杂,不利于推广应用.另外,在电力系统中有源电力滤波器的安装主要考虑到容量受到限制,无法应用于大功率场合和无功不平衡较为严重的场合^[14].

(3) 混合电力滤波器.根据不同的功能结构需求,混合型滤波器主要有以下两类:一类是电力线路功率调节器,即单纯的有源与无源两者的混合;另一类是有源滤波器与其他变流器的联合电路结构,该结构能够将无功功率补偿与谐波治理功能分别实现^[15].

混合电力滤波器能够改善无源滤波装置的品质因数,提高滤波效果,防止设备过电流,适应三相平衡补偿,不平衡系统分相补偿等.

2 大规模风电并网对电网稳定性的影响因素及应对措施

2.1 频率稳定性

2.1.1 产生原因

为追求风能的最大化利用,风电机组通常在最大功率点运行,不提供有功备用,无法在系统频率下降时提供类似传统机组的调频等辅助服务.如果缺失的这部分惯性响应和频率调节能力得不到补充,将使系统整体惯性和频率调节能力减弱,使系统在扰动(机组脱网、线路故障、负荷突变)下的频率变化率增加、频率最低点降低、稳态频率偏差增加,发生频率稳定性问题更频繁^[16].

2.1.2 应对措施

变速型风机具有较大的控制灵活性,通过调整控制目标和控制策略,可以使机组主动响应系统频率的变化,使其具备类似于传统机组的惯性响应和频率调节能力.目前,风力发电机组主要通过转子惯性、超速和变桨方式进行有功功率控制,以参与系统频率的调节.

(1) 转子惯性控制.转子惯性控制是风电机组运行过程中,通过改变机组转子侧变流器的电流给定,控制转子速度发生临时性变化情况下短时释放/吸收风电机组旋转质体所存储的部分动能,以快速响应系统频率的暂态变化,提供类似于传统机组的转动惯量^[17].

转子惯性控制适用于全风速工况,可提供惯性响应,对系统动态稳定性贡献大,响应速度快;但持续时间较短,转子转速恢复造成频率二次降低,低频低速和高速时,难以提供有效惯性^[18].

(2) 转子超速控制.转子超速控制是控制转子超速运行,使风机运行于非最大功率捕获状态的次优点,保留一部分的有功功率备用,用于一次频率调节^[19].

转子超速控制适用于中低速工况,响应速度快,对系统动态稳定性贡献大,提供一次调频备用;但在高速时,难以提供系统要求的备用容量,风速波动性影响提供备用容量的可信度,采用减载发电模式在一定程度上降低了风电场效益^[20].

(3) 变桨距控制.变桨距控制是通过控制风机的桨距角,改变桨叶的迎风角度与输入的机械能量,使其处于最大功率点之下的某一运行点,从而留出

一定的备用容量. 风况一定的情况下, 桨距角越大, 机组留有的有功备用也就越大^[21].

变桨控制主要用于高风速工况, 提供一次调频备用, 调节能力强, 调节功率范围广; 但受机械特性限制, 响应速度较慢, 对系统动态稳定性贡献较小, 桨叶机械损耗增加, 降低机组运行寿命, 风速的随机波动影响备用容量的可信度^[22].

基于以上分析, 很多研究提出将风电机组上述调频手段进行组合应用, 以形成优势互补, 提高风电调频能力和运行的经济效益. 风电机组的组合控制有效利用了自身调频手段的优点, 但也不可避免受制于风速变化和机组运行状态的影响, 在全风况下参与系统一次调频和惯性响应的容量可信度难以得到有效保证.

2.2 电网无功欠缺

2.2.1 产生原因

并网风电场主要由风电机组、变压器、输电线路、升压站主变等感性设备组成, 这些设备在正常运行时, 需要从电网吸收一部分无功功率, 如表1^[23]所示. 若不对其进行控制, 将导致电网无功欠缺, 增加输电线路损耗, 降低传输容量. 当风电场内部或电网出现扰动时, 易引起系统电压失稳, 给电网的稳定运行带来威胁.

表1 风电场各设备正常运行时的无功损耗
Tab.1 Reactive power loss in normal operation of wind farm

无功损耗类型	相对有功出力比例/%
主变励磁损耗	0.6
220kV 阻抗损耗	14
110kV 阻抗损耗	10.5
箱式变励磁损耗	1
阻抗损耗	6.5
合计	32.6

2.2.2 应对措施

风电场的无功补偿分为静态和动态两种. 由于静态无功补偿装置无法实现动态无功补偿, 通常与动态补偿装置配合使用^[24]. 动态无功补偿装置主要有同步调相机、晶闸管控制电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)、静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等^[25].

风电场在进行电能质量治理时, 经常选取的无功补偿装置有静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器(STATCOM).

(1) 静止无功补偿器(SVC). 通过加装SVC进行电能质量治理的主要原理是当风电场电压下降时, SVC发出无功功率, 使节点电压上升; 反之, 当节点电压升高时, SVC吸收无功功率, 使节点电压

下降. 风电场并网点通过加装SVC可以动态调节风电场无功功率, 平滑电压波动并改善谐波, 对风电场的电能质量进行治理.

(2) 静止同步补偿器(STATCOM). STATCOM的优点在于动态连续补偿功率因数, 可以发无功, 也可吸收无功, 自动补偿系统风电场所需要的无功功率. 一方面有效解决了谐波干扰投切并联电容器装置的问题, 另一方面, 可根据风电场实际要求抑制或治理谐波, 改善电能质量.

STATCOM与SVC相比, 在技术上具有以下一些优势^[26]: 1) 响应速度快. SVC的响应时间约为20~40ms, STATCOM的响应时间为5ms, 更有利于风电场电能质量的快速改善. 2) 谐波电压小. STATCOM由于采用电力电子逆变技术的无功补偿方法可以消除自身输出电压中的谐波成分. 在用STATCOM进行电能质量治理时, 系统的谐波电压更小. 3) 输出特性好. 风电场并网点在电压较低时, STATCOM可以注入更大容量的无功功率, 提高并网点的电压, 相比同容量的SVC更具有技术上的优势. 4) 占地面积小. 同容量的STATCOM占地面积仅为SVC的1/3~1/2.

尽管STATCOM在技术上更有优势, 但SVC在价格上更为经济. SVC的价格一般在180~300元/kVar, 而STATCOM为1000~1500元/kVar. 因此在实际应用中, 需根据治理目标综合考虑成本和技术上的最优组合, 使综合治理成本最小.

3 通过改进传统风电机组解决大规模风电并网问题

以上分析表明, 采用电压波动和闪变的抑制策略、应用滤波器治理谐波、控制有功功率、加装无功补偿装置等技术来提升电能质量、提高电网稳定性是当前我国解决大规模风电并网问题采取的主要措施. 这在一定程度上使并网风电场满足了电网的要求, 但存在控制策略繁琐、技术手段复杂、系统成本过高等弊端, 增加了风电系统的复杂性和不稳定性. 若想从根本上解决大规模风电并网与电网之间的矛盾, 还需改进传统风电机组, 将随风速变化的不可控量转变为可控量, 使其发电特性与传统发电方式的电能特性类似, 从而更好地适应电网.

3.1 液力耦合调速装置

Dewind公司提出Windrive液力耦合调速装置,

将行星齿轮与液力调距器组合,齿轮箱高速轴与同步发电机轴连接实现前端调速.输出电能具有良好的正弦性.机组的低电压穿越能力和无功支持能力相比传统机组均有较大提升^[27].

3.2 电磁耦合调速装置

陈基和、周强明等人提出了基于电磁耦合器调速的新型风电机组,电磁耦合器的两端分别与变速齿轮箱的高速轴和恒速同步发电机的输入轴连接,两个轴系之间的转速差由电磁耦合器及变频器控制.当电网电压跌落时,同步发电机通过强励向电网提供无功支撑,有助于电网电压的恢复;同时发电机的故障冲击转矩被电磁耦合器隔离,保护了齿轮箱免受冲击载荷破坏^[28].

3.3 机电混合无级变速系统

孙西凯和程明提出了一种新型机电混合无级变速风力发电系统 M-EVT,采用一级机械增速装置进行升速,电气无级变速器进行调速.提供了机械功率和电功率双功率流,保证较高的输出电能质量以及系统可靠性;同时减小了电气变速器的容量和速差,提高了风能利用率和系统效率^[29].

3.4 永磁双转子调速系统

付兰芳、孙鹤旭、王华君等提出了由永磁双转子调速电机连接齿轮箱与常规同步发电机的新型风力发电机组.该机组具有常规电站类似的电能质量和并网特征;在应对电网故障和无功调节等方面较传统机组有明显优势;调速电机有效隔离了发电机故障对齿轮箱的冲击破坏^[30].

与传统机型相比,现有改进型机组在一定程度上提升了风力发电的电能质量,提高了风电机组的可靠性,电网适应性更强.但同时存在体积大、成本高、控制策略繁琐、技术手段复杂等弊端.因此需要以体积小、成本低、故障率低、发电效率高、便于控制,以及较高电能质量和较强的电网适应性为目标继续优化风电机组.

4 结论与展望

大规模风电并网给电能质量和电力系统稳定性造成一定程度的影响,在加装电力装置降低或消除该负面影响的同时还需改进完善传统机组,从根本上解决风电并网与电力系统之间的矛盾,开发新型结构或采用先进控制策略使风电机组接近或达到常规电站的并网特性,满足风电大规模接入电网的“友好性”.

“智能风机”是未来风电机组的发展方向,通过智能控制技术、主动性能控制、数据分析专家系统和基于可靠性的决策算法的组合及应用,实现风机准确感知自身状态和外部环境条件,优化调整控制策略和运行方式,达到降低有害载荷,提高机组发电量和系统可靠性,增强电网适应性等目标.

参 考 文 献

- [1] R Grünbaum. SVC light: a powerful means for dynamic voltage and power quality control in Industry and distribution [J]. Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000(9): 404~409.
- [2] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用 [J]. 电工技术学报, 2013(05): 88-98.
- [3] ke Larsson. Flicker emission of wind turbines caused by switch operations [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1): 119~123
- [4] 杨 颀, 纪志成. 抑制风剪切和塔影效应引起的风力机电压闪变 [J]. 江南大学学报(自然科学版), 2011, (10): 1-5
- [5] 戴成昕. 电压波动与闪变的抑制研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011
- [6] 江海敏, 袁 越, 张新松, 等. 储能系统在风电场闪变抑制中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013(25): 7-12
- [7] Virtanen A, Tuusa H. Performance comparison of conventional STATCOM and STATCOM with energy storage in a low voltage induction motor application [C]//IEEE. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). New Jersey: IEEE, 2012: 4719-4726.
- [8] 王 晗, 龚真兰, 张建文, 等. 基于 LCL 的风电并网逆变器无传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2013(01): 188-194.
- [9] 张 磊, 罗 毅, 肖雅元, 等. 大规模风电并网条件下 AGC 机组跨区分布式最优协调控制 [J]. 电工技术学报, 2016(09): 42-49.
- [10] Sugirtha M G, Latha P. Analysis of power quality problems in grid connected wind power plant [C]//IEEE. International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering. New Jersey: IEEE, 2011: 19-24.
- [11] 于 东, 孙 欣, 高丙团, 等. 考虑风电不确定出力的风电并网协调优化模型 [J]. 电工技术学报, 2016, 09: 34-41.
- [12] 巢睿祺. 风力发电并网中的谐波检测与综合治理研

- 究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [13] 李广磊,李笋,孙树敏,等.基于STATCOM和LCC-MTDC技术的大规模风电并网技术研究[J].电力系统保护与控制,2014(05):32-39.
- [14] 谭璐,夏向阳.风电并网难点及节能减排效益分析研究[J].电气技术,2013(03):19-23.
- [15] 杨宏,苑津莎,吴立增.基于风电功率预测的电网静态调峰能力极限研究[J].电工技术学报,2014(04):266-273.
- [16] Abeynayake G, Attanayaka T L B, Jayawardane V G R G, et al. Power Quality Analysis of Grid Connected Wind Power Plants in West Coast of Sri Lanka: A Case Study [C]// IEEE. International Conference on Industrial and Information Systems. New Jersey: IEEE, 2015.
- [17] 陈厚合,李国庆,张芳晶.风电并网系统区域间概率可用输电能力计算[J].电力系统保护与控制,2014,21:59-65.
- [18] 张明锐,梅杰,李元浩,等.基于切换仿射系统的风电电压稳定控制[J].电工技术学报,2016(03):171-179.
- [19] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等.风力发电的调频技术研究综述[J].中国电机工程学报,2014,25:4304-4314.
- [20] Miller N W, Clark K, Shao M. Frequency responsive wind plant controls: Impacts on grid performance [C]// IEEE. 2011 IEEE in Power and Energy Society General Meeting. San Diego: IEEE, 2011: 1-8.
- [21] 李立成,叶林.变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(17):26-31.
- [22] Wu Ziping, Gao Wenzhong, Wang Jianhui, et al. A coordinated primary frequency regulation from permanent magnet synchronous wind turbine generation [C]//IEEE. IEEE in Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA). Denver: IEEE, 2012: 1-6.
- [23] 张昭遂,孙元章,李国杰,等.超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J].电力系统自动化,2011,35(17):20-25.
- [24] 田云飞,张立涛,徐昊亮.大规模风电并网对电力系统的影响及应对措施[J].电气自动化,2013(03):54-56.
- [25] 刘薇.风电并网对电能质量影响的评估与治理[D].北京:北京交通大学,2014.
- [26] 张红,谭万禹,史存城,等. STATCOM与SVC在电力系统运行中的比较分析[J].吉林电气,2009,37(3):24-27.
- [27] Wind Power Generation. The new program against the U. S. wind power market [EB/OL]. [2010-01-20].
- [28] 陈基和,周强明,柴建云,等.基于电磁耦合器调速的新变速恒频风力发电机组[J].清华大学学报(自然科学版),2011(03):361-366.
- [29] 孙西凯,程明.新型机电混合无级变速风力发电系统[J].中国电机工程学报,2012,03:49-55+16.
- [30] 付兰芳,孙鹤旭,王华君,等.基于永磁双转子电机调速的新型风力发电系统设计[J].电力系统自动化,2014,15:25-29.