

文章编号: 1006-4729(2006)03-0283-04

风力发电并网技术及其对电能质量的影响

马昕霞¹, 宋明中², 李永光¹

(1. 上海电力学院 上海 200090 2 宝钢股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 介绍了风力机组并网技术和风力发电机并网及运行试验, 分析了风力发电机组并网对电网电能质量的影响, 探讨了引起波动和闪变的机理及闪变测量模型, 论述了电压波动与闪变的抑制方法.

关键词: 并网; 电压波动; 闪变; 风力发电

中图分类号: TM 614 **文献标识码:** A

Cutting in Technology and its Effect on the Power Quality of Wind Power Generation System

MA Xin-xia¹, SONG Ming-zhong², LI Yong-guang¹

(1. Shanghai University of Electric Power Shanghai 200090 China;

2 Bao Steel Co Ltd, Shanghai 201900 China)

Abstract The cutting in technology and test method for wind power generation system are introduced. And the effect on the power quality in the power network caused by cutting in scheme of wind power generation are analyzed. Then the mechanism causing the voltage fluctuation and flicker by wind turbines and the model of flicker measurement are discussed in depth. Finally the paper emphatically discusses the suppression methods for fluctuation and flicker.

Key words cutting in; voltage fluctuation; flicker; wind power

风力发电是 21 世纪发展最快的一种可再生能源, 随着风电场的容量越来越大, 对系统的影响也越来越明显, 研究风电并网对系统的影响已成为重要课题. 早期风电的单机容量较小, 大多采用结构简单、并网方便的异步发电机, 直接和配电网相连. 而风电场所在地区往往人口稀少, 处于供电网络的末端, 承受冲击的能力很弱, 因此, 风电很有可能给配电网带来谐波污染、电压波动及闪变问题, 风电的随机性给发电和运行计划的制定带来很多困难. 本文主要介绍了风力机组并网技术和风力发电机并网及运行试验, 分析了风力发电机组并网对电网电能质量的影响, 深入探讨了引起波动与闪变的机理和闪变测量模型, 并详细论

述了电压波动与闪变的抑制方法.

1 风力发电机组的并网技术

交流发电机并网条件是发电机输出的电压与电网电压在幅值、频率以及相位上完全相同. 随着风力发电机组单机容量的增大, 在并网时对电网的冲击也越大. 这种冲击严重时不仅会引起电力系统电压的大幅度下降, 还可能对发电机和机械部件(塔架、桨叶、增速器等)造成损坏. 如果并网冲击时间持续过长, 还可能使系统瓦解或威胁其他挂网机组的正常运行. 因此, 采用合理的并网技术是一个不容忽视的问题^[1].

1 1 同步风力发电机组并网技术

同步发电机在运行中,既能输出有功功率,又能提供无功功率,且周波稳定,电能质量高,已被电力系统广泛采用.然而,将其移植到风力发电机组上使用时却不很理想.这是因为风速时大时小,随机变化,作用在转子上的转矩极不稳定,并网时其调速性能很难达到同步发电机所要求的精度.并网后若不进行有效的控制,常会发生无功振荡与失步问题,在重载下尤为严重.因而在相当长的时间内,国内外风力发电机组很少采用同步发电机.但近年来随着电力电子技术的发展,在同步发电机与电网之间采用变频装置,可从技术上解决这些问题,因此,采用同步发电机的方案又引起了人们的重视.

1 2 异步风力发电机组并网技术

异步风力发电机投入运行时,由于靠转差率来调整负荷,因此对机组的调速精度要求不高,不需要同步设备和整步操作,只要转速接近同步转速时,就可并网.显然,风力发电机组配用异步发电机不仅控制装置简单,而且并网后也不会产生振荡和失步,运行非常稳定.

然而,异步风力发电机并网也存在一些特殊问题,如直接并网时产生的过大冲击电流会造成电压大幅度下降,对系统安全运行构成威胁;本身不发无功功率,需要无功补偿;过高的系统电压会使其磁路饱和,无功激磁电流大量增加,定子电流过载,功率因数大大下降;不稳定系统的频率过于上升,会因同步转速上升而引起异步发电机从发电状态变成电动状态,不稳定系统的频率过大下降,又会使异步发电机电流剧增而超载等.因此,必须严格监视并采取相应的有效措施才能保障风力发电机组的安全运行.目前,国内外采用的异步发电机的风力发电机组并网方式主要有直接并网法、准同期并网方式、降压并网方法、捕捉式准同步快速并网和软并网等.

2 风力发电机并网及运行试验

国标 GB/T 19070-2003(风力发电机组控制器试验方法)规定了并网型风力发电机组控制器试验条件、试验方法及与电网并联运行相应的规范^[2].发电机并网及运行试验主要包括软并网功

能试验、补偿电容投切试验、小电机一大电机切换试验和大电机一小电机切换试验.

(1)软并网功能试验 将机组主轴升速,当异步发电机转速接近同步速(约为同步速的92%~99%)时,并网接触器动作,发电机经一组双向晶闸管与电网连接,控制晶闸管的触发单元,使双向晶闸管的导通角由0°至180°逐渐增大,调整晶闸管导通角打开的速率,使并网过程中的冲击电流不大于技术条件的规定值.暂态过程结束时,旁路开关闭合,将晶闸管短接.

(2)补偿电容投切试验 在机组并网运行时,通过调整发电机输出功率,在不同负载下观察电容补偿投切动作是否正常.

(3)小电机一大电机切换试验 在机组并网运行时,通过由小到大增加发电机负载功率,观察小电机一大电机切换过程.

(4)大电机一小电机切换试验 在机组并网运行时,通过由大到小减少发电机负载功率,观察大电机一小电机切换过程.

在上述试验过程中,通过瞬态记录器记录波形参数及并网过程中的冲击电流值,同时观察并网接触器和旁路接触器及电容补偿投切动作是否正常.

3 风电并网对电能质量的影响

随着越来越多的风电机组并网运行,风力发电对电网电能质量的影响引起了广泛关注.风资源的不确定性和风电机组本身的运行特性使风电机组的输出功率呈波动性,可能会影响电网的电能质量,如电压偏差、电压波动和闪变、谐波等.风力发电机组大多采用软并网方式,但是在启动时仍然会产生较大的冲击电流.当风速超过切出风速时,风机会从额定出力状态下自动退出运行.如果整个风电场所有风机几乎同时动作,这种冲击对配电网的影响十分明显^[3].不但如此,风速的变化和风机的塔影效应都会导致风机出力的波动,而其波动正好处在能够产生电压闪变的频率范围之内(低于25 Hz),因此,风机在正常运行时也会给电网带来闪变问题^[4].电压波动和闪变是风力发电对电网电能质量的主要负面影响之一.

3 1 电压波动与闪变的机理分析

风力发电引起电压波动和闪变的根本原因在

于并网风电机组输出功率的波动, 下面分析并网风电机组输出功率波动引起电压波动和闪变的机理^[3]. 图 1 为风电机组并网示意图, 图中: $\dot{E}$ 为风电机组出口电压相量; $\dot{V}$ 为电网电压相量; R, X 分别为线路电阻和电抗; I_a, I_r 分别为有功电流和无功电流相量. 一般而言, 有功电流要远大于无功电流.

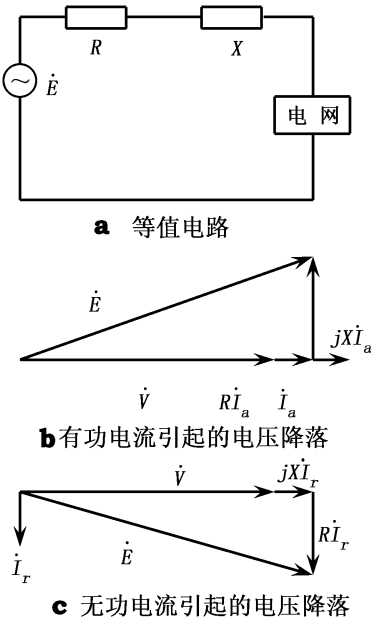


图 1 风电机组并网示意

由图 1b 可见, $R I_a$ 是造成电压降落的主要原因, $j X I_a$ 与 $\dot{V}$ 垂直, 造成的电压降落可以忽略不计. 由图 1c 可见, $j X I_r$ 是造成电压降落的主要原因, $R I_r$ 与 $\dot{V}$ 垂直, 造成的电压降落可以忽略不计. 因此, 有功电流和无功电流都会造成明显的电压降落, 分别为 $R I_a$ 和 $j X I_r$. 当并网风电机组的输出功率波动时, 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.

3.2 闪变的检测与计算

闪变是人对灯光照度波动的主观视感. 人对照度波动的最大觉察频率范围为 $0.05 \sim 35 \text{ Hz}$, 其中闪变敏感的频率范围约为 6.12 Hz ^[9]. 衡量闪变的指标有短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} . 短时间闪变值是衡量短时间 (若干分钟) 内闪变强弱的一个统计量值. 短时间闪变值的计算不

仅要考虑电压波动造成的白炽灯照度变化, 还要考虑到人的眼和脑对白炽灯照度波动的视感. 长时间闪变值由短时间闪变值推出, 反映长时间 (若干小时) 闪变强弱的量值^[7].

根据 IEC 61000-4-15 制造的 IEC 闪变仪是目前国际上通用的测量闪变的仪器, 有模拟式和部分或全部是数字式两种结构, 其简化原理框图见图 2.

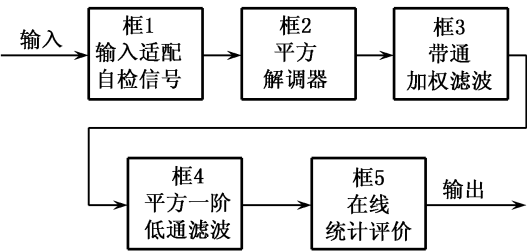


图 2 IEC 闪变仪模型的简化框图

框 1 为输入级, 除用来实现把不同等级的电源电压降到适用于仪器内部电路电压值的功能外, 还产生标准的调制波, 用于仪器的自检. 框 2 框 3 框 4 综合模拟了灯—眼—脑环节对电压波动的反应. 其中, 框 2 对电压波动分量进行解调, 获得与电压变动成线性关系的电压; 框 3 的带通加权滤波器反映了人对 $60 \text{ W } 230 \text{ V}$ 钨丝灯在不同频率的电压波动下照度变化的敏感程度, 通频带为 $0.05 \sim 35 \text{ Hz}$. 框 4 包含一个平方器和时间常数为 300 ms 的低通滤波器, 用来模拟灯—眼—脑环节对灯光照度变化的暂态非线性响应和记忆效应. 框 4 的输出 $S(t)$ 反映了人的视觉对电压波动的瞬时闪变感觉水平. 可对 $S(t)$ 作不同的处理来反映电网电压引起的闪变情况. 进入框 5 的 $S(t)$ 值可用积累概率函数 (CPF) 的方法进行分析.

由 CPF 曲线获得短时间闪变值 P_{st} :

$$P_{st} = (0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50})^{0.5} \tag{1}$$

式中, $P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$ 分别为 CPF 曲线上等于 $0.1\%, 1\%, 3\%, 10\%, 50\%$ 时间的 $S(t)$ 值.

长时间闪变值 P_{lt} 由测量时间段内包含的短时间闪变值计算获得

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{stj})^3} \tag{2}$$

式中, n 为长时间闪变值测量时间内所包含的短时间闪变值个数.

3.3 电压波动与闪变的抑制

目前,大部分用于改善和提高电能质量的补偿装置都具有抑制电压波动与闪变的功能^[8],如静止无功补偿器(SVC)、有源滤波器(APF)、动态电压恢复器(DVR),以及配电系统电能质量统一控制器(DS Unicon)等。

3.3.1 静止无功补偿器(SVC)

电压闪变是电压波动的一种特殊反映,闪变的严重程度与负荷变化引起的电压变动相关,在高电压或中压配电网中,电压波动主要与无功负荷的变化量及电网的短路容量有关。在电网短路容量一定的情况下,电压闪变主要是由于无功负荷的剧烈变动所致。因此,对于电压闪变的抑制,最常用的方法是安装静止无功补偿装置,目前这方面的技术已相当成熟。但是,由于某些类型的SVC本身还产生低次谐波电流,须与无源滤波器并联使用,实际运行时可能由于系统谐波谐振使某些谐波严重放大。因此,在进行补偿时,要求采用具有响应时间短、且能够直接补偿负荷的无功冲击电流和谐波电流的补偿器。

3.3.2 有源电力滤波器(APF)

要抑制电压闪变,必须在负荷电流急剧波动的情况下,跟随负荷变化实时补偿无功电流。近年来,采用电力晶体管(GTR)和可关断晶闸管(GTO)及脉宽调制(PWM)技术等构成的有源滤波器,可对负荷电流作实时补偿。有源电力滤波器的工作原理与传统的SVC完全不同,它采用可关断的电力电子器件,基于坐标变换原理的瞬时无功理论进行控制,其作用原理是利用电力电子控制器代替系统电源向负荷提供所需的畸变电流,从而保证系统只须向负荷提供正弦的基波电流。

有源电力滤波器与普通SVC相比,有以下优点:响应时间快,对电压波动、闪变补偿率高,可减少补偿容量;没有谐波放大作用和谐振问题,运行稳定;控制强,能实现控制电压波动、闪变和稳定电压的作用,同时也能有效地滤除高次谐波,补偿功率因数^[9]。

3.3.3 动态电压恢复器(DVR)

在中低压配电网中,有功功率的快速波动同样会导致电压闪变,这就要求补偿装置在抑制电压波动与闪变时,除了进行无功功率补偿使供电线路无功功率波动减小外,还需提供瞬时有功

率补偿。因而传统的无功补偿方法不能有效地改善这类电能的质量,只有带储能单元的补偿装置才能满足要求。

动态电压恢复器(DVR)是将1台由3个单相电压源变流器构成的三相变流器串联接入电网与欲补偿的负荷之间^[10]。这里的逆变器采用3个单相结构,目的是为了更灵活地对三相电压和电流进行控制,并提供对系统电压不对称情况的补偿。该装置的核心部分为同步电压源逆变器,当线路侧电压发生突变时,DVR通过对直流侧电源的逆变产生交流电压,再通过变压器与原电网电压相串联,以补偿系统电压的跌落或抵消系统电压的浪涌。由于DVR通过自身的储能单元,能够在ms级内向系统注入正常电压与故障电压之差,可用于克服系统电压波动对用户的影响。因此,它是解决电压波动、不对称、谐波等动态电压质量问题的有效工具,是面向负荷的补偿装置,起到将系统与负荷隔离的作用。该装置仅对特定负荷加以补偿,所以其容量仅取决于负荷的补偿容量和要求的补偿范围。

目前,大部分DVR装置的直流侧采用电容来提供直流电压,只能提供有限的能量,若要求DVR长时间提供电压补偿,则必须让DVR输出的电压和电流垂直,这样DVR装置不提供有功,只进行无功交换,即可满足长期工作的要求。

3.3.4 统一电能质量控制器及其他补偿装置

统一电能质量控制器(UPFC)结合了串、并联补偿装置的特点,具有对电压、电流质量问题统一补偿的功能,属于综合的补偿装置。含有储能单元的串、并联组合的用户电力综合补偿装置,除了应用于配电系统的谐波补偿外,还可以解决瞬时供电中断和电压波动等动态电压质量问题,提高供电的可靠性。

4 结束语

风力发电引起的电压波动和闪变的研究已进行了很长时间,取得了丰硕的成果。采用静止无功补偿器和感性储能装置可以减小并网风电机产生的功率波动,从而减小电压波动和闪变。但由于风资源的不确定性、风电机单机容量不断增加,风力发电并网技术及其引起的电压波动和闪变还有待于进一步的研究。

(下转第 291 页)

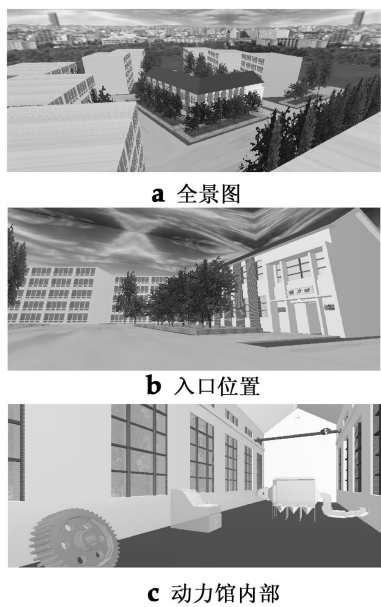


图 7 系统运行效果

4 结 论

采用 CAD 软件与 3D M ax 软件相结合, 可以准确直观地建立虚拟系统中的三维模型, 同时, 通过编辑 VRML 代码可以有效地控制人在系统中的运动和设备的仿真. 虚拟现实技术与网络技术的结合, 可以建立一个集声音、图像及其他多媒体元素于一体的三维虚拟环境, 它不仅复制了一个完全的立体化模型, 而且可以使人自由地浏览、参观, 产生身临其境的感觉.

参考文献:

[1] 刘一松. 多用户 VRML 技术在构造 3D 人人交互界面中的应用[J]. 计算机工程, 1999 25 49-51

[2] 张立亭, 周世健, 陈竹安, 鲁铁定. 基于 3D M ax 的城市小区三维图的制作[J]. 测绘学院学报, 2004 21(2): 2-4

[3] 汪娟娟. 虚拟现实在数字校园中的应用[J]. 计算机仿真, 2003 (6): 79-81

(上接第 286 页)

参考文献:

[1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002 4.

[2] GB /T 19070-2003. 风力发电机组控制器试验方法[S]. 2003 5-6

[3] Larsson. Flicker Emission of Wind Turbines Caused by Switching Operation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion 2002 17(1): 119-123

[4] Larsson. Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion 2002 17(1): 114-118

[5] Achemann T, Gamer K, Gardiner A. Embedded Wind Generation in Weak Grids economic Optimization and Power Quality

Simulation[J]. Renewable Energy 1999 18(2): 205-221

[6] 孙树琴. 电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998

[7] GB /T 12326-2000 电能质量、电压波动和闪变[S]. 2000 424-432

[8] 严干贵. 电能质量控制方法[C], 全国高等学校电力系统及其自动化专业第 16 届学术年会论文集, 2000.

[9] Bhin Singh, Kamal A. ZHaddad, Ambrish Chandra. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement[J]. IEEE Trans on Industry Electronics 1999 46(5): 960-971

[10] Choi S S, L I B H, Vithanamuwa D M. Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection[J]. IEEE Trans on Power Systems 2000 15(1): 51-57