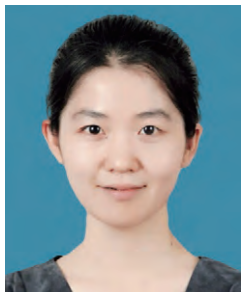


基于三型风机的次同步谐振相关现象分析

风能是取之不尽、用之不竭的清洁、可再生能源。当前,大力发展风电是解决我国能源供需矛盾、减轻环境污染、调整能源结构以及转变经济增长方式的有力抓手。根据我国可再生能源发展战略规划,到2020年我国风电装机容量将达到2亿kW。考虑到风力发电特性,大规模风电并网后会出现电网电压水平下降、线路传输功率超出热极限等一系列问题。串联补偿网络中的三型风机会产生次同步谐振,介绍了基于PSS/E的双馈式感应发电机及其模型,阐述了次同步谐振(SSR)的原理、现象及其分析技术,基于奈奎斯特稳定判据分析三型风机的SSR现象,最后介绍了一些次同步谐振的解决方法。

肖 莞 徐衍会/华北电力大学电气与电子工程学院



肖 莞/硕士研究生

我国风能资源较丰富,但适合大规模开发风电的地区一般都处于电网末端,由于此处电网网架结构较薄弱,因此大规模风电接入电网后可能会出现电网电压水平下降、线路传输功率超出热极限、系统短路容量增加和系统暂态稳定性改变等一系列问题。本文将以风力发电中的一个严重的危害——次同步谐振为主题展开说明。

世界上首个被应用在输电线路上的串联电容器是在20世纪30年代。工程设计人员很快意识到串联电容器和输电线路的电感之间存在潜在谐振的可能性。20世纪70年代初,莫哈维电厂发生了第一起真实的次同步谐振事件。起初一个缓慢增长的振动最终导致了汽轮机主轴损坏。随后的分析与测试确定了此次事件是由一个附近的协同涡轮发电机的第一次扭振作用造成的,500 kV输电网络的串联补偿所造成的电力振荡加重了本次事件的严重性。由于电力振荡的频率

低于正常电力系统的同步频率,因此把这种扭振称之为次同步谐振。

风力发电的特性及双馈式感应发电机(DFIG)模型

1. 风力发电特性

自然风的主要特点表现在随机性、区域性和季节性等方面,若要利用风力发电,考虑一定的机械因素影响后,自然风的特性将会发生一定程度的转变,根据文献[1]的研究,风电出力主要有以下特点。

1) 风力发电的保证出力很小,其可为电力系统提供的有效容量较小,但是结合系统负荷特性和风电的季节性特点,通过合理的设计可以适当提高风电场设计有效容量。

2) 风电出力具有不完全随机性,其中随机性是指其具有较大的波动性和间歇性,而不完全是指风电出力具有可预报性和明显的地理、季节特性。

3) 各小风电场之间具有一定的互补性,通过集中上网的方式可有效缓解风电出力的急剧变化,从而不制约风电上网;并可减少相同上网容量时的弃风率,提高风电容量的有效率。

4) 风电场规模较小时瞬时出力变化率较大,有可能3~4 min内剧变会达到50%以上,对电力系统稳定性的影响很大。

2. 基于PSS/E的DFIG及其模型

双馈式感应发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)主要是由风机、齿轮箱、感应发电机、功率变流器

关键词/Keywords

风力发电 ·
次同步谐振 ·
次同步相互作用 ·
扭转相互作用 ·

和跨接器组成。DFIG在普通绕线式异步感应电动机的基础上外加了连接在转子滑环与定子之间的变频器及其控制系统,电流通过感应发电机的滑环进出转子绕组,转子通过AC-DC-AC功率变流器与电网相连,实现了电网频率和机械频率的解耦控制,跨接器对风机变流器起到保护作用。基于DFIG的变速风电机组结构如图1所示,根据所采用的控制技术可将其分为恒功率因数控制和恒电压控制两大类。在潮流计算中,可根据控制方式的不同将风电机组机端母线视为PQ节点或PV节点,一般常用模型是包含两质块轴系模型、变频器控制模型和双馈异步电动机模型的变速风电机组动态模型。

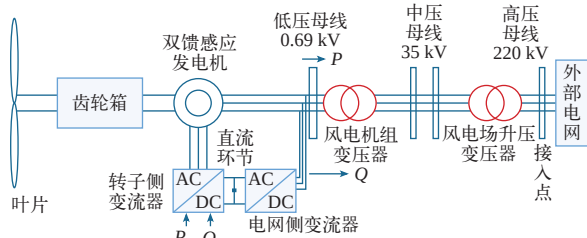


图1 基于DFIG的变速恒频机组结构

PSS/E是由西门子公司开发的电力仿真软件,在其平台上开发的风电模型专门用于风电场特性及其并网的相关研究。许多风机生产商提供PSS/E模型,以用于输电网技术规范的校验。在大型变速恒频风力发电系统中双馈型风机比重很大,并且随着双馈风机的单机容量和装机容量不断提升,对风电场和电网之间互相影响的研究具有更加重要的意义。

完整的双馈风机模型包括发电机-换流器模型(WT3G)、电气控制模型(WT3E)、风力机及传动轴系模型(WT3T)和桨距角控制模型(WT3P)。它们之间的关系如图2所示。

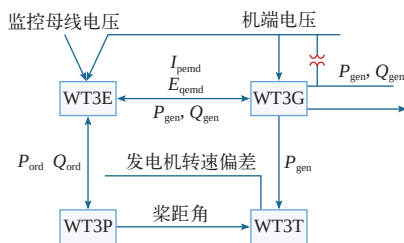


图2 WT3的分块模型框图

图2中, I_{pemd} 为控制有功的电流命令值; E_{qemd} 为控制无功的电压命令值; P_{ord} 、 Q_{ord} 为有功功率和无功功率指令值。

根据文献[2]的研究结果,可以得到以下结论。

1) 发电机-换流器模型(WT3G)。该模型将发电机看作带有暂态电抗的简化电流源,模型中并没有考虑发电机的损耗。机端电压 V_{term} 过低时,有功功率输出会受到低压有功逻辑(LVPL)上限的限制,这样可以减少故障中与故障后的系统电压恢复压力,使无功具有调控优先权。

2) 风力机及传动轴系模型(WT3T)和桨距控制模型(WT3P)。风力机及传动轴系采用了两质量块模型。故障期间的机械功率振动大小表明了传动系统的机械应力的数量级。在故障期间和故障之后,桨距角控制可以减少气动功率。

3) 电气控制模型(WT3E)。该模型控制电压和无功功率的方法有3种,分别为恒定电压控制、恒定功率因数控制和恒定无功功率控制。旁路闭环电压控制是可以选择的,当开启闭环电压控制功能时,极限值的输入很有可能会导致电压的不稳定。为了避免该问题的发生,可以通过提高控制器的上限 XIQ_{max} ,这样会使得故障期间的无功电流增大。同时,用户也可以对风机进行实际调研,以确定速度-功率特性曲线。

4) 该模型中没有包括低电压穿越模块。风机的保护可以通过VTGTPA和FRQTPA实现,但是其实现曲线通常不能满足电网的要求。因此,PSS/E中风机模型的保护模块(如低电压穿越)可以作为未来的研究方向。

次同步谐振现象

1. 次同步谐振概念及原理

次同步谐振(Subsynchronous Resonance, SSR)是指电气系统与发电机组之间以低于系统同步频率的某个或多个振荡频率交换能量的一种不正常运行状态^[3],这种振荡是由发电机组和带串联补偿电容的输电线路间的耦合作用产生的,系统对该振荡所呈现的弱阻尼、无阻尼,甚至负阻尼特性使得这种振荡的振幅会呈现出逐渐增大的趋

势。当轴系上遭受微小扰动时，发电机的转子上会产生角度位移增量，可能引起角速度的增量。用 ω_k 表示轴系某一自然扭振频率的标么值，则相应的角速度增量为

$$\Delta\omega = A\cos\omega_k t \quad (1)$$

该角速度增量会引起发电机定子电压、电流和电磁转矩的变化。首先是导致定子电压中产生频率为 $1-\omega_k$ 的次同步电压，对输电线中带有串联补偿的系统，若与定子回路相连接的线路中电感与电容形成了谐振回路且谐振频率恰好为 $1-\omega_k$ ，则定子中的次同步电压会在回路中产生频率为 $1-\omega_k$ 的电流分量。该电流增量会在空间中感应出次同步频率下的旋转磁场，该磁场将在发电机轴系上产生增量电磁转矩，即

$$\Delta T = \Psi_{d0}\Delta i_q + \Psi_{q0}\Delta i_d \quad (2)$$

式中， Ψ_{d0} 、 Ψ_{q0} 分别为磁通的d轴和q轴分量。该转矩增量是与扰动产生的角速度增量同相位的驱动转矩，其对次同步频率的振荡分量产生了负阻尼作用，从而使得机械系统与电气系统产生了相互激励。一旦这种激励超过了系统中的各种阻尼和电阻中的功率消耗，那么振荡就将维持或发散。

2. SSR现象

SSR现象有两种不同类型的情况，即次同步谐振扭振作用（Subsynchronous Torsional Interaction, SSTI）和次同步谐振瞬间转矩作用。

在一个特定的次同步扭转频率下，当串联补偿传输系统的负阻尼超过其固有的主轴机械阻尼时，会发生扭振作用。这种扭振作用力就是破坏莫哈维发电厂汽轮机主轴的“元凶”。

在系统收到干扰（比如故障）期间，串联LC组合电路的输电线放大了汽轮机轴承上的压力，产生了瞬间转矩作用，并会造成重大的人员伤亡。由瞬间转矩引起的严重轴承损坏事件迄今为止并没有相关记录。

串联电容器不是发生SSR的唯一来源器件，如果进行不正确的操作，HVDC转换器的快速动作装置、电力系统稳定器、FACTS设备以及其他电力基础设备都有与附近涡轮发电机耦合发生扭振作用的潜在威胁。次同步谐振作用刚开始出现是

在研究Square Butte和CU HVDC系统的时候。迄今为止，扭振现象只局限在传统热电厂中，水电厂很少受到这种现象的干扰，因为水电厂发电机的惯性大，并且涡轮的固有机机械阻尼较高。如果这些可能产生扭振的设备发生了次同步谐振，它们产生的相关现象在串联补偿线路之间、FACTS设备之间和一些基于现代电力电子技术的风力发电机之间是相同的。它经常被称之为次同步控制相互作用（Subsynchronous Control Interaction, SSCI），因为没有机械元素和扭转元素的参与。

3. 次同步谐振技术分析

当前，频率扫描技术、特征值技术和时域仿真技术是在研究SSR现象中最常用的分析技术。频率扫描技术是用于一个初始的审查研究，发电机通过一个频率函数来确定系统阻抗。系统的阻抗和设备的机械参数可用来估计扭振的潜在威胁程度，同时对识别特殊系统条件具有重大意义。要进行更深入的研究，就必须确定扭转作用力和瞬间转矩作用力的实际值。特征值技术利用线性简化的系统模型来估计各种等级的串联补偿和基于扭转阻尼的传输系统拓扑结构下的扭振作用力。时域仿真技术用于分析瞬间转矩，可以分析非线性作用力，这种仿真技术也可以对一个发生大量故障的系统进行评估。

基于奈奎斯特稳定判据分析SSR现象

1. 基于阻抗的奈奎斯特稳定判据

基于阻抗的小信号分析已经应用到了电力转换器分析当中^[4-5]，一个拥有电源阻抗和负荷阻抗的系统如图3所示。

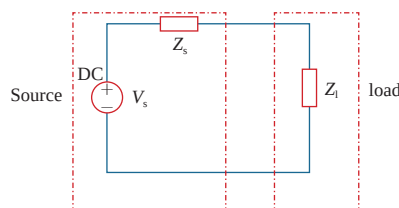


图3 一个电源和一个负荷的小信号分析图

电流可以表示为

$$I(s) = \frac{V(s)}{Z_s(s) + Z_l(s)} = \frac{V(s)}{Z_l(s)} \frac{1}{1 + Z_s(s)/Z_l(s)} \quad (3)$$

假设电源是一个理想的电压源时电压源和负荷都是稳定的,为了系统的稳定性,分母 $1+Z_s(s)/Z_l(s)$ 所有的零点应该在开放的左半平面。根据奈奎斯特稳定判据,当且仅当逆时针环绕圈数与右半平面极点数相等时,系统达到稳定状态。假设没有右半平面极点,奈奎斯特图则不会绕 $(-1+j0)$ 逆时针绕圈。如果奈奎斯特图有绕圈,则系统不稳定,也可以这样表达:存在一个频率 ω_0 使得 $Z_s(j\omega_0)/Z_l(j\omega_0)$ 为纯实数,并且 $Z_s(j\omega_0)/Z_l(j\omega_0)$ 的值小于 -1 或者

$$Z_s(j\omega_0) = R_s + jX_s = -KZ_l(j\omega_0) = -K(R_l + jX_l) \quad (4)$$

式中, K 为一实数,且 $K>1$ 。因此 $R_s + R_l < R_s + KR_l = 0$ 。因此,奈奎斯特不稳定性等价于一个负网络电阻。在学术上,负网络电阻利用频率扫描技术解释并判断IGE现象。

2. 用稳定判据分析SSR现象

奈奎斯特稳定性判据可以用来解释三型风机的SSR现象。文献[6]中展示了一个由带有局部连续电压源转换器的三型风机和串联补偿网络组成的研究系统,如图4所示。

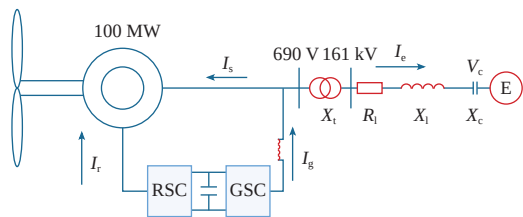


图4 带有局部连续电压源转换器的三型风机和串联补偿网络组成的系统研究图

为了研究这两种阻抗,系统中每相的等值电路如图5所示。为了简化系统做出一些假设:忽略电网侧转换器的分流支路,忽略感应机器的电磁感应分支。所有的假设都是合理的,因为阻抗与其平行支路的阻抗相比要大很多。在分析过程中,转子侧转换控制器电流控制的环路增益假设为很小的值,因此可以忽略RSC的等值阻抗。这种假设简化的系统只能用来进行说明解释,更深层次的研究中会有详细的阻抗模型来解释SSR控制转换器的影响。

图5中, R_s 和 R_r 和 L_{ls} 、 L_{lr} 为定子和转子的电阻

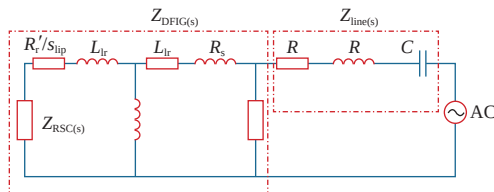


图5 等值电路图

和电感。

串联补偿线路的阻抗可以表示为

$$Z_{lines}(s) = R + Ls + \frac{1}{Cs} \quad (5)$$

式中, R 、 L 和 C 分别为线路的电阻、电感和串联补偿电抗。三型风机的阻抗取决于滑片频率和定子的频率 ω ,滑片频率与旋转速度 ω_m 和转子频率 ω 有关。为了电路分析,旋转角速度可以假设为定值,因为机械动力要比电气动力慢得多。滑片频率可以表示为 $1 - \omega_m/\omega$ 。在拉普拉斯域中,滑片频率可以表示为

$$S_{lip}(s) = \frac{s - j\omega_m}{s} \quad (6)$$

式中, ω_m 为旋转角速度。

因此,双馈式感应风力发电机的阻抗从其终端来看可以表示为

$$Z_{DFIG}(s) = R_r / S_{lip}(s) + R_s + (L_{ls} + L_{lr})s \quad (7)$$

式中, Z_{line} 为电源阻抗; Z_{DFIG} 为负荷阻抗。

3. SSR建模概述

串联补偿三型风机的SSR现象已在文献[6]中建模,结论总结如下。

1) 网络模型和风机扭转模型间的扭转相互作用是非常罕见的。这是因为风机涡轮的轴承很轻且扭转模型的频率很低(小于3 Hz),为了得到扭转相互作用,网络必须要有一个很高等级的补偿,以达到很高的网络频率(大于47 Hz)。

2) 感应发电机的作用是产生SSR的主要因素,这大概归因于SSR频率下的负转差率,其导致了在低风速下产生等值负转子阻抗。负反馈电流控制装置对电力系统的稳定性也有不利的影响。

次同步谐振的解决方法

当前有很多解决SSR现象的方法,文献[7-9]中

给出了详细的分类。在这些类别中,有些方法的思想是增加电气阻尼(比如减小串联电容器的尺寸),另一些方法考虑的是增加扭转阻尼(比如补充激发阻尼控制SEDC)。有的方法既可以解决SSTI,也可以解决次同步谐振瞬间转矩作用,另外的一些方法只能解决SSTI(比如半导体闸流管控制的串联补偿)。

由于SSR与串联补偿等级直接关联,因此最直接的解决办法就是限制串联补偿规模。可以在任何系统情况下使用一个固定的限制来解决SSR;也可以通过特定的操作程序来实施一个情景依赖性限制。后者更适用于在正常系统条件下对系统有重大意义的高等级串联补偿中,并且能够对SSR的潜在威胁程度进行充分的分析,以识别关键意外事件或者其他操作情况。针对SSR现象也能够通过附加设备来达到抑制作用。比如被动SSR闭塞滤波器,其可以在发电机或者串联电容器中使用。这种滤波器可以在次同步频率出现时阻止电流。SEDC可以用来增加一个特定发电机的扭转阻尼,半导体闸流管控制的串联电容器也有同样的功能,其能效很大程度上取决于控制系统的设计。HVDC系统的扭振可以用合理的初期分析,外加控制设计或者后期的修改来解决。

上述所有方法都是从抑制的角度来考虑的,下面则是从保护的角度来考虑。比如通过一种扭转继电器的应用来实现保护,这类方法对发电机单元有着重要意义。这类继电器会监控涡轮发电机轴承以防止扭振发生,并在一个特定的阈值发出错误信号,这个信号将切断或关闭装置和SSTI的来源设备(比如一个串联电容器组)。如果SSR只是发生在并联传输线路上或其他脱离设备的纯系统元素中时,基于保护角度的方法更为适合。因为在这种情况下,尽管SSR发生后造成的危害很大,但是相对而言发生的可能性很低。因此在这种情况下,保护发电机不受伤害而不是抑制SSR成为了一种更为经济的选择。

次同步相互作用和风力发电机

随着技术的发展,SSR现象出现在了新设备、

新应用以及一些挑战性的系统条件下。每一次SSR事故的发生,电力行业对其的理解以及对如何选择各种抑制和保护的措施都更加深化。近期的关注热点是串联补偿传输线路和风力发电机控制之间发生扭振的可能性^[10-15]。文献[11]中阐述了一次2009年10月的SSCI事故,该事故发生在三型(双馈)风力发电机控制装置和一个串联电容器之间,事故初期,在一条345 kV的传输线路上进行常规的清除故障操作,故障清除后,两风电场(总额定功率达485 MW)迅速与一条带有50%串联补偿的单回线路发生相互感应,不衰减的次同步谐振迅速在风机控制装置和串联电容器之间发展,最后导致了严重的过电压,并损坏了设备。

经后续的研究证实发生了SSCI事故,这次事故表明了消弧电路的启动会造成感应发电机的自激发特性,次同步电流产生次同步电压,次同步电压反过来维持或增加次同步电流。此次事故发生后,考虑并采取了很抑制措施,包括用半导体闸流管控制的串联补偿来替代串联电容器,在串联电容器或风电场中安装闭塞滤波器,使用SSR继电器以及一些不考虑串联电容器因素的保护措施等。

结束语

对风电特性、次同步谐振、SSR建模以及一些相关现象进行了综述,同时对SSR的分析技术、抑制与保护措施进行了概述。最后,介绍了一起近期发生的三型(双馈)风力发电机和一个串联电容器之间的SSCI事故。本文对于研究次同步谐振现象有一定的价值。

参考文献

- [1] 吕朝阳,张丹庆,李怀玉.我国风电大规模外送协同运行方式研究[J].水电能源科学,2012,30(9):202-205.
- [2] 李娜,徐政.PSS/E中的双馈风机模型[J].机电工程,2012,29(9):1080-1084,1103.
- [3] 顾威,李兴源,王渝红,等.UPFC对风电场次同步谐振的抑制作用[J].电力系统自动化,2010,

- 34 (8) : 101-105.
- [4] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2011, 26 (11) : 3075-3078.
- [5] Sun J. Small-signal methods for ac distributed power systems-a review [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2009, 24 (11) : 2545-2554.
- [6] Fan L, Kavasseri R, Miao Z, et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (4) : 2073-2082.
- [7] Bowler C E J, Baker D H, Mincer N A, et al. Operation and test of the navajo SSR protective equipment [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97 (4) : 1030-1035.
- [8] Bowler C E J, Demcko J A, Menkoft L, et al. The navajo SMF type subsynchronous resonance relay [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97 (5) : 1489-1495.
- [9] Piwko R J, Wegner C A, Kinney S J, et al. Subsynchronous resonance performance tests of the slatt thyristor-controlled series capacitor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11 (2) : 1112-1119.
- [10] Irwin G D, Jinda A K, Isaacs A L. Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-6.
- [11] Suriyaarachchi D H R, Annakkage U D, Karawita C, et al. Application of an SVC to damp sub-synchronous interaction between wind farms and series compensated transmission lines [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2012: 1-6.
- [12] 孟昭军. 风电并网与进展研究 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28 (3) : 61-66.
- [13] 白建华, 辛颂旭, 贾德香. 我国风电大规模开发面临的规划和运行问题分析 [J]. 电力技术经济, 2009, 21 (2) : 8-11.
- [14] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31 (3) : 77-81.
- [15] 伊专, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于SVC的大型风电场次同步谐振抑制 [J]. 华东电力, 2012, 40 (7) : 1134-1139.

(收稿日期: 2015-02-10) EA

(上接第68页)

- 流接地系统故障选线的新判据 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6) : 54-58.
- [6] 张耘川, 苏宏升. 小电流接地系统故障定位新方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27 (2) : 32-38.
- [7] 董新洲, 王珺, 施慎行, 等. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (10) : 154-160.
- [8] 周淦, 马小敏, 陈伟根, 等. 基于Zigbee和零序电流增量法的配网单相接地故障定位方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (9) : 62-68.
- [9] 倪广魁, 鲍海, 张利, 等. 基于零序电流突变量的配电网单相故障带电定位判据 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (31) : 118-122.
- [10] 李林, 冯勇, 郑剑飞, 等. 中性点采用两种接地方式的配电网单相接地故障的比较 [J]. 高压电器, 2008, 44 (3) : 239-242.

(收稿日期: 2015-02-09) EA