

“风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究

李生福^{1,2}, 张爱玲¹, 李少华¹, 郝正航^{1,3}, 曹森¹, 张望¹, 柴建云³

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025;
3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:“风火打捆”交直流外送是未来千万千瓦级风电能源基地电力外送的重要方式之一, 亟需掌握“风火打捆”交直流外送系统的稳定特性及其机理。功角是反映系统暂态稳定性的主要标志, 分析了双馈电机的功角快变特性和“风火打捆”系统等值机械转动惯量对火电机组功角暂态稳定性的影响。针对系统的暂态稳定性问题, 提出了一种附加控制策略, 并设计出控制装置样机, 可提高“风火打捆”系统的暂态稳定性。基于所提附加控制策略的试验样机通过了实时数字仿真器(Real Time Digital Simulator, RTDS)的闭环验证, 结果表明: 该附加控制策略通过改变直流输送功率和调节风机的有功输出, 消除或减小了系统在暂态过程中的瞬时不平衡功率, 增强了直流系统和风机对火电机组的等效阻尼作用, 有效抑制了火电机组的功角摇摆幅度, 提高了“风火打捆”系统的暂态稳定性。

关键词: 风火打捆; 交直流; 转动惯量; 附加控制; 实时数字仿真器

Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system

LI Shengfu^{1,2}, ZHANG Ailing¹, LI Shaohua¹, HAO Zhenghang^{1,3}, CAO Sen¹, ZHANG Wang¹, CHAI Jianyun³

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the 10 GW wind power bases in China, wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system is regarded as one of feasible ways, but the stability characteristic of this kind of transmission system should be investigated. Angle is the special symbol to reflect the system transient stability, in the paper, the influence of angle rapidly changing behavior of DFIG and equivalent mechanical rotational inertias of wind-thermal-bundled system on synchronous generators angle transient stability characteristic are studied. To solve the problems of transient stability, an additional control strategy is proposed and is designed to become a control device prototype. Using real-time digital simulator (RTDS), the control device prototype is validated, simulation results show that the proposed additional control strategy can enhance the equivalent damping effect of DC system and DFIG to synchronous generators by changing the DC transmission power and adjusting the active power output of DFIG which can eliminate or reduce the imbalance of instant power in the transient process, as a result, the amplitude of angle fluctuation can be effectively inhibited, and the transient stability characteristic of wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system is improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267003).

Key words: wind-thermal-bundled; AC/DC; rotational inertias; additional control; RTDS

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0108-07

0 引言

为了推进能源转型, 中国近年来坚持大力发展

基金项目: 国家自然科学基金(51267003); 许继电气股份有限公司资助项目(2013); 中国博士后科学基金项目(2013M531678); 河南省博士后科研资助项目(2011049); 贵州省社发科技攻关项目(黔科合SY字[2011]3081)

可再生能源^[1-2]。风力发电是可再生能源利用中最成熟、最具规模化开发条件的技术之一。我国规划建设千万千瓦级风电基地主要分布在西部、北部和东部沿海地区, 煤电基地也主要集中在“三北”地区, 风电和火电分布地区重叠, 且两种能源均存在大规模、远距离输送至东部和中部负荷中心的客观需求^[3]。采用“风火打捆”交直流外送的方式, 不仅可满足大规模传统能源和可再生能源外送的基本要

求,而且可以保证特高压直流通道输送功率的平稳,大幅提高直流系统的设备利用率^[4]。大规模能源集中接入、远距离输送以及风电电源本身的出力、控制特性等都决定了风电并网会对电网运行产生较大影响,且这种影响具有不同于常规电源的特殊性^[5]。在酒泉、哈密等地区已并网的风电对电网安全稳定运行的影响已经凸显,且随着并网规模、容量的加大,这种影响将进一步加剧,因此,大规模风电能源跨区消纳存在技术难题。

“风火打捆”交直流外送系统稳定问题突出,需要考虑暂态稳定、小扰动稳定和次同步振荡等技术问题^[6-8],以及特高压直流系统与送端“风火打捆”电源间的协调配合问题^[3,9-10]。目前,特高压直流送端为“风火打捆”电源的结构模式在全球绝无仅有,其稳定性相关研究较少,特别是针对“风火打捆”系统中风电对交直流混合输送系统的功角暂态稳定性影响还有很多问题需要深入研究^[11-14]。

文献[11]认为风火功角曲线为主动交越将不利于系统功角稳定,文献[13]认为这种不利主要是源于双馈风力发电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)的快速恢复特性;但另有学者认为由DFIG构成的风电场有利于风火打捆系统的功角稳定性^[15];文献[14]则认为由于风火交互影响具有不确定性,风电场对电网的影响利弊皆有可能。

本文以哈密—郑州特高压直流输电工程为背景,分析了双馈电机的功角快变特性和等值机械转动惯量对“风火打捆”系统火电机组功角暂态稳定性的影响。针对系统的暂态稳定性问题,提出了一种附加控制策略,并设计出控制装置样机,可提高“风火打捆”系统的暂态稳定性。基于所提附加控制策略的试验样机通过了实时数字仿真器(Real Time Digital Simulator, RTDS)的闭环验证。

1 “风火打捆”交直流外送系统及其模型

1.1 “风火打捆”交直流外送系统

所谓“风火打捆”交直流外送系统是指直流送端为哈密“风火打捆”电源基地(“风火打捆”电源由大规模双馈风电场和常规火电厂SG按一定比例捆绑构成),通过交流联络线L_{AC}与西北电网连接后,经特高压直流输电系统与三华电网连接,实现风电的就地消纳和远距离外送。

本文基于RTDS建立如图1的仿真系统模型。包括哈密“风火打捆”电源基地、西北电网、特高压直流输电系统及三华电网。

仿真系统中,用5台DFIG等值机模拟风电场群,其中,等值风机定子电阻为 $R_s=0.0046$ p.u.,定子

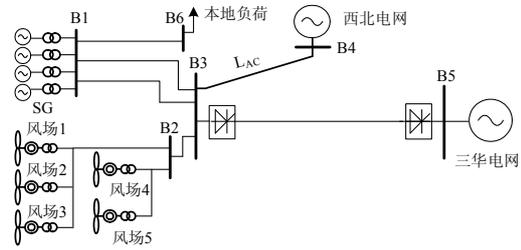


图1 哈密“风火打捆”电源基地交直流外送系统简化接线图

Fig. 1 Hami wind-thermal-bundled bases power Transmitted by AC/DC system

漏抗为 $X_s=0.1020$ p.u., 转子电阻为 $R_r=0.0060$ p.u., 转子漏抗为 $X_r=0.0859$ p.u.。4台同步发电机组模拟常规火电厂,同步发电机组采用同步发电机模型、励磁系统和调速系统模型模拟,其中,同步发电机定子电阻为 $R_s=0.0020$ p.u., 定子漏抗为 $X_s=0.2330$ p.u., d轴饱和电抗为 $X_d=1.7130$ p.u., q轴饱和电抗为 $X_q=1.6420$ p.u.。

风电场风速初始值为11 m/s,输出的有功功率为0.23 p.u.(以“风火打捆”电源总容量为基值),SG的有功出力为0.60 p.u.,送端母线B3的额定电压为1.0 p.u.,特高压直流系统为定功率控制,输送功率为0.56 p.u.,线路等效为π型有损耗线路。

1.2 “风火打捆”交直流外送系统模型

1.2.1 风机机械传动部分模型

本文为了简化计算,将机械传动部分等效成一个集中质量块,采用一阶惯性环节来表示为

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{T_d} (P_T - P_m) \quad (1)$$

式中: P_m 和 P_T 分别是发电机转子轴上的机械功率和其输出的电磁功率; T_d 是机械传动部分的惯性时间常数。

1.2.2 DFIG的数学模型

以DFIG的定子电压矢量为q轴,在dq坐标系下,且选取定子磁链(ψ_{ds} , ψ_{qs})和转子电流(i_{dr} , i_{qr})为状态变量时,状态方程可表达为^[16]

$$\begin{cases} p\psi_{ds} = -\frac{r_s}{l_s}\psi_{ds} + l''r_s i_{dr} + \omega_1\psi_{qs} \\ p\psi_{qs} = -\frac{r_s}{l_s}\psi_{qs} + l''r_s i_{qr} - \omega_1\psi_{ds} + u_{qs} \\ pl'i_{dr} = -r_r i_{dr} + u_{dr} + \omega_s l''i_{qr} + \omega_s l''\psi_{qs} - l''p\psi_{ds} \\ pl'i_{qr} = -r_r i_{qr} + u_{qr} - \omega_s l''i_{dr} - \omega_s l''\psi_{ds} - l''p\psi_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $l' = (l_r - l_m^2/l_s)$, $l'' = l_m/l_s$, l_s 、 l_r 和 l_m 分别是定、转子自感和互感; r_s 、 r_r 分别是定、转子电阻; ω_1 和 ω_s 分别是同步转速和转差; u_{dr} 、 u_{qr} 分别

是励磁电压纵、横轴分量； u_{qs} 是定子电压； p 是微分算子。

根据磁链方程，将转子电流替换为定、转子磁链表达，且认为定子磁链近似恒定而忽略其微分项，则由方程(2)可推出

$$\begin{cases} p l_s' \psi_{dr} = -l_s r_r \psi_{dr} + l_m r_r \psi_{ds} - l_2 u_{dr}^* \\ p l_s' \psi_{qr} = -l_s r_r \psi_{qr} + l_m r_r \psi_{qs} - l_2 u_{qr}^* \end{cases} \quad (3)$$

式中： $l_2 = l_m^2 - l_s l_r$ ； u_{dr}^* ， u_{qr}^* 是引入前馈补偿后新的控制量^[17-18]。

1.2.3 特高压直流输电系统模型

特高压直流一次系统采用准稳态模型模拟，代数方程描述直流换相过程、T型等值电路模型描述直流线路及平波电抗器，将代数方程与微分方程合并消元，可以得到式(4)所示的特高压直流输电系统数学模型。

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_{dr\Sigma}} (-R_d I_{dr} - U_c + \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{dr} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_{dr}) \\ I_{di} = \frac{1}{L_{di\Sigma}} (-R_d I_{di} - U_c - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{di} \cos \beta - \frac{3}{\pi} X_i I_{di}) \\ U_c = \frac{1}{C} (I_{dr} - I_{di}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： I_{dr} ， I_{di} ， U_c 为状态变量； I_{dr} 和 I_{di} 分别为整流端和逆变端直流电流； U_c 为直流线路中点电压； R_d 为直流电阻； C 为直流线路等值对地电容； U_{dr} 和 U_{di} 分别为整流端和逆变端直流电压； $L_{dr\Sigma}$ 和 $L_{di\Sigma}$ 分别为整流端和逆变端等效电感； X_r 和 X_i 分别为整流端和逆变端的换流电抗； α 和 β 分别为整流端触发滞滞后角和逆变端触发越前角。

1.3 参考系统(纯火电系统)

为了说明“风火打捆”系统的功角暂态稳定性的强弱，需要建立一个可作为比较对象的参考系统。在图1所示系统的基础上，假设一个与之对标的参考系统，如图2所示，将图1系统中B3接入的风电场替换为一座等容量的常规火电厂(SG1)，为表述方便，下文称图1系统为“风火打捆”系统，图2

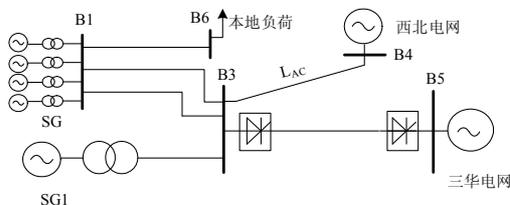


图2 “纯火电”交直流外送系统

Fig. 2 Pure thermal power transmitted by AC/DC system

系统为“纯火电”系统。下文将对两种系统做多方面的对比分析。

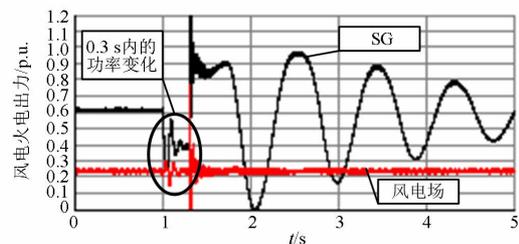
2 “风火打捆”系统SG功角暂态稳定的影响因素

影响“风火打捆”系统 SG 功角暂态稳定的因素是多样的，本文主要研究 DFIG 的功角快变特性和送端电源的等值机械惯量对其产生的影响。

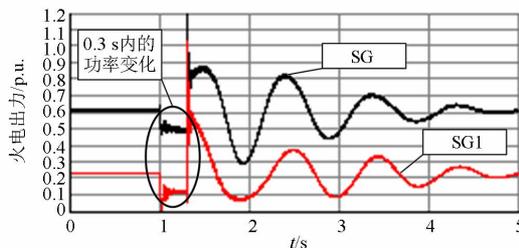
2.1 DFIG 的功角快变特性对 SG 功角暂态稳定的影响

为了便于研究，图1系统中，本文定义 DFIG 与同步机的功角含义为内电势 E_0 与母线 B4 的夹角，这样，DFIG 在功角概念上可以与同步机统一起来，但两种电机的功角暂态行为相差甚远。根据常规电力系统稳定分析我们知道，系统在故障扰动下，受转子惯性时间常数的作用，同步机的功角是“慢变”的。然而，对于 DFIG，如式(3)所示，在故障扰动下，分别对应于内电势 q 轴和 d 轴分量的转子磁链 ψ_{dr} 和 ψ_{qr} 会在约为十几毫秒的时间常数 ($\tau = l'/r_r$) 下产生快变行为，由于引入了 dq 解耦调节，当出现其中一个轴向的显著调节时，必然引起功角的突变，这就是 DFIG 的功角快变特性。

分别在图1和图2系统中，设西北电网联络线 L_{AC} 在 $t=1$ s 时受故障扰动断开，故障清除时间为 $t=0.3$ s。故障发生后，送端系统出现瞬时不平衡功率，由于 DFIG 的功角快变特性，其功率输出也具有快速恢复特性，有功功率将在很短的时间内恢复到初值，即 DFIG 的功率输出基本保持不变，瞬时不平衡功率由 SG 独自承担，使 SG 的加速转矩增大，容易造成 SG 功角失稳。而“纯火电”系统中瞬时不平衡功率由 SG 和 SG1 共同承担，减小了 SG 的加速转矩，提高 SG 的功角稳定，如图3所示。



(a) “风火打捆”系统



(b) “纯火电”系统

图3 系统送端电源的出力

Fig. 3 Power output at sending end system

1 s 时发生故障后, 图 3(a)中, 瞬时不平衡功率由 SG 独自承担, 故障清除前的 0.3 s 内, 其功率输出下降 0.2 p.u.; 图 3(b)中, 瞬时不平衡功率由 SG 和 SG1 共同承担, 故障清除前的 0.3 s 内, SG 的功率输出下降 0.1 p.u.。此时“风火打捆”系统 SG 的加速转矩为“纯火电”系统 SG 的两倍, 可以断定, “风火打捆”系统 SG 的功角首摆幅度必然大于“纯火电”系统。

综上所述, 由于 DFIG 的功角快变特性, DFIG 在故障期间不能参与功率调节, 降低了“风火打捆”系统 SG 的功角暂态稳定性。

2.2 机械惯量对 SG 功角暂态稳定的影响

根据同步发电机转子运动方程, 发电机的转子惯性时间常数表达式为

$$T_j = \frac{J\Omega_0^2}{S_B} \quad (5)$$

式中: J 为机械惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; Ω_0 为同步转速下的机械角速度, rad/s ; S_B 为同步机功率基值, VA。

SG 功角动态受 T_j 影响很大, 大型 SG 的 T_j 一般在 5~10 s 范围。因此, 即使在极端故障(电磁转矩降为 0)下, SG 的功角由初始值摇摆到临界值也需要 1 s 左右的时间。由式(5)看出, T_j 与机械惯量成正比关系, 机械惯量越大, T_j 越大, SG 的功角动态变化就越慢, 功角暂态稳定性就越高。可以说, 机械惯量是常规电力系统抵御大扰动最重要的保证。

从式(3)可以看出, 励磁绕组的 d 轴磁链 ψ_{dr} 可由 u_{dr}^* 独立控制, q 轴磁链 ψ_{qr} 可由 u_{qr}^* 独立控制。由于 d 轴和 q 轴分量均独立可控, 所以励磁绕组总磁链的方向仅仅决定于控制量 u_{dr}^* 和 u_{qr}^* , 而与转子位置没有关系, 实现了风电机组机械量与电气量间的解耦。换句话说, 风机的励磁磁势方向与转轴之间没有联系, 风机转速变化和内电势转速变化也没有联系, 即电网频率与风机转子的机械角度相互解耦, 导致了风电机组机械惯性与电力系统的“机电解耦”。

这一“机电解耦”特性导致了图 1 系统中送端电源的等值机械惯量小于图 2 系统, 前者抵御扰动的能力将会低于后者。系统受扰后, 图 1 系统中 SG 的功角暂态稳定性会弱于图 2 系统。

2.3 故障下的 SG 功角稳定性

分别设图 1 和图 2 系统西北电网联络线 L_{AC} 在 $t=2$ s 时受故障断开, 经过 $t=0.3$ s 后重合。“风火打捆”系统和“纯火电”系统受扰后 SG 的功角摇摆曲线如图 4 所示。

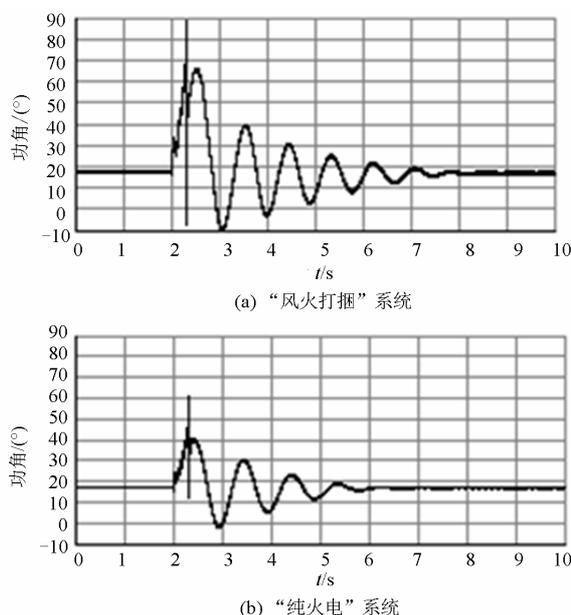


图 4 SG 功角摇摆曲线

Fig. 4 Angle rocking curve

可以看出, 故障前两系统的 SG 功角基本相同, 而在 2 s 受扰后, 图 4(a)中, “风火打捆”系统 SG 功角首摆幅度为 68° , 摇摆持续时间为 6 s; 图 4(b)中, “纯火电”系统 SG 功角首摆幅度为 40° , 摇摆持续时间为 4 s。前者功角首摆幅度高于后者, 摇摆持续时间长于后者。一方面, 如 2.1 节分析, 由于 DFIG 的功角快变特性, DFIG 在故障期间不能参与功率调节, “风火打捆”系统 SG 的功角首摆幅度大于“纯火电”系统。另一方面, 如 2.2 节分析, 由于 DFIG 的“机电解耦”特性, “风火打捆”系统中送端电源的等值机械惯量小于“纯火电”系统, 前者抵御扰动的能力低于后者。两方面的共同作用下, 使“风火打捆”系统 SG 的功角暂态稳定性弱于“纯火电”系统。

进一步分析, “风火打捆”系统故障清除极限时间为 $t=0.35$ s; “纯火电”系统故障清除极限时间为 $t=0.55$ s。

3 附加控制策略及控制装置样机

3.1 附加控制策略

当“风火打捆”系统发生故障时, 系统出现不平衡功率, 根据第 2 节的分析, 一方面由于 DFIG 的功角快变特性, 使该不平衡功率由 SG 独自承担, 增大了 SG 的功角摇摆幅度; 另一方面由于风机的“机电解耦”特性, 导致了系统送端电源的等值机械惯量减小, 减弱了系统的抗故障能力。因此, 系统在

不平衡功率的作用下暂态稳定性降低。针对这一问题, 本文提出了一种“风火打捆”系统的附加控制策略。控制原理如图 5。

对于“风火打捆”交直流外送系统, 暂态过程中瞬时功率的不平衡导致了系统的功角摇摆, 而直流送端系统的频率变化可反映系统瞬时功率的平衡状况, 例如系统瞬时功率过剩会导致频率上升, 瞬时功率不足时会引起频率下降。

该控制策略引入直流送端系统频率反馈量, 根据频率的变化, 动态调节风电场的有功输出和直流系统的输送功率, 从而快速减小或消除暂态过程中系统的瞬时不平衡功率, 以达到抑制“风火打捆”系统的功角摇摆的目的。

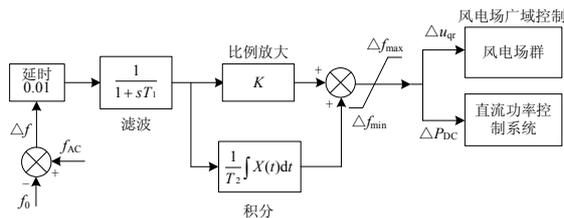


图 5 “风火打捆”交直流外送系统附加控制
Fig. 5 Additional control of wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system

图 5 中: f_0 为额定频率; f_{AC} 为直流送端系统反馈频率; T_1 为滤波器时间常数; T_2 为积分时间常数; K 为比例增益; Δf_{min} 和 Δf_{max} 分别为附加控制信号的下限值和上限值; Δu_{qr} 为 DFIG 转子 q 轴励磁电压指令修正值, 实现风电场群的动态有功调节; ΔP_{DC} 为直流输送功率指令修正值, 实现动态改变直流输送功率。

3.2 附加控制器参数整定

利用工程整定方法, 通过试验对附加控制器参数进行整定, 并在实际运行中进行最后调整与完善。

(1) 确定比例系数 K

确定比例增益 K 时, 去掉延时环节、滤波环节、PI 的积分项, 即令延时为 0、 $T_1=0$ 、 $T_2=0$, 使控制器为纯比例调节。输入设定为系统允许的最大值的 60%~70%, 由 0 逐渐加大比例增益 K , 直至系统出现振荡; 再反过来, 从此时的比例增益 K 逐渐减小, 直至系统振荡消失, 记录此时的比例增益 K , 设定 PI 的比例增益 K 为当前值的 60%~70%。比例增益 K 调试完成。

(2) 确定积分时间常数 T_2

比例增益 K 确定后, 设定一个较大的积分时间常数 T_2 的初值, 然后逐渐减小 T_2 , 直至系统出现振荡, 之后再反过来, 逐渐加大 T_2 , 直至系统振荡消

失。记录此时的 T_2 , 设定 PI 的积分时间常数 T_2 为当前值的 150%~180%。积分时间常数 T_2 调试完成。

(3) 确定滤波器时间常数 T_1

按保证低频信号通过设置 T_1 值, 使该滤波环节能有效地滤掉误差信号的高次谐波。

最后, 对整定的附加控制器参数进行微调与完善, 使之满足性能要求。本文中, T_1 取为 0.1, T_2 取为 0.05, K 取为 0.6。

3.3 控制装置样机

根据 3.1 节所述的附加控制原理, 将图 5 中的附加控制策略设计成控制装置样机。样机的组成和功能如下。

(1) 数据采集和处理模块(控制器): 样机的核心部分采用数字信号处理器(DSP), 包括信号的采集、转换、处理。该模块采集母线 B3 频率反馈量实时数据, 并通过控制算法将该数据经过计算处理(控制算法原理如图 5 所示), 最后输出 CAN 控制信号。

(2) 光电转换模块: 将输出的 CAN 控制信号转换为光信号, 同时将传输到控制对象处的光信号转换为 CAN 控制信号。

(3) 光纤: 传输光信号到控制对象。

(4) 模拟输出模块: 将 CAN 控制信号转换为模拟信号输入控制对象(整流站控制器)。

(5) 信号电缆: 传输模拟信号。

控制装置样机结构框图如图 6 所示, 实物图见图 7。

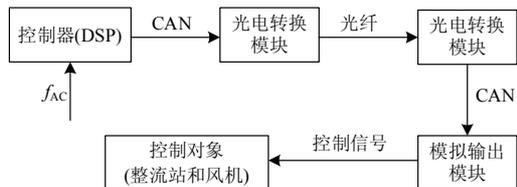


图 6 装置样机结构图
Fig. 6 Device prototype structure chart



图 7 RTDS 与控制装置样机实物图

Fig. 7 RTDS and control device prototype physical chart

3.4 “风火打捆”系统的附加控制样机试验

通过以上分析及试验结论, 根据所提出的附加

控制策略及设计的控制装置样机,对“风火打捆”系统进行附加控制试验。设图1系统西北电网联络线 L_{AC} 在 $t=2\text{ s}$ 时受故障断开,经过 $t=0.35\text{ s}$ 后重合。试验结果如图8所示。

在故障时间为 $t=0.35\text{ s}$ 时,无附加控制的“风火打捆”系统SG的功角暂态失稳,如图8(a);而有附加控制后,系统SG的功角暂态稳定,如图8(b)。

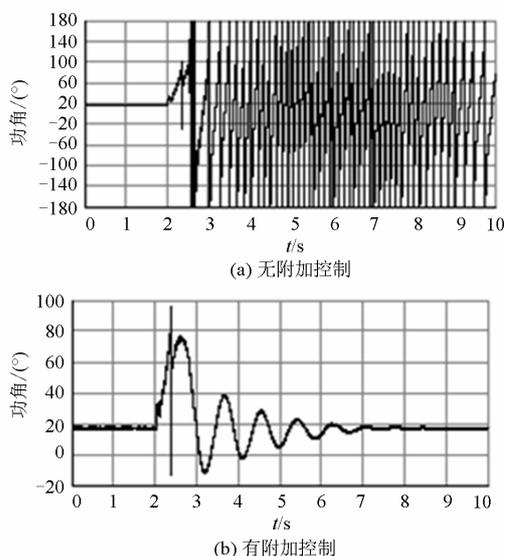


图8“风火打捆”系统的功角摇摆曲线

Fig. 8 Angle rocking curve of wind-thermal-bundled system

故障发生后,送端电源总功率与直流系统输送功率间出现瞬时过剩功率,送端系统频率增大,采用附加控制后,一方面风电场参与有功功率的调节,降低自身的有功输出,另一方面直流系统输送功率增加,快速减小或消除了“风火打捆”系统的不平衡功率。同时增加了直流系统对SG的等效阻尼作用,从而抑制了系统的功角摇摆幅度,使系统功角暂态稳定,有效地改善了“风火打捆”系统的暂态稳定性。

4 结论

与“纯火电”系统相比较,“风火打捆”系统有以下特点:

(1) 由于DFIG的功角快变特性,DFIG在故障期间不能参与功率调节,降低了“风火打捆”系统SG的功角暂态稳定性。

(2) 由于DFIG的“机电解耦”特性,对电网不提供机械惯量,并网后“风火打捆”系统送端电源的等值机械惯量减小,受扰后功角摇摆幅度增大,导致“风火打捆”系统抵御扰动的能力减弱。

以上特点导致了“风火打捆”交直流外送系统

的功角暂态稳定性较差,针对该问题,本文提出了一种附加控制策略,并设计出控制装置样机。试验证明,该附加控制策略对“风火打捆”系统的功角摇摆具有明显的抑制作用,提高了“风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定性。

参考文献

- [1] 向月,刘俊勇,魏震波,等. 可再生能源接入下新型可中断负荷发展研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 148-155.
XIANG Yue, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Research on development of new interruptible load with renewable energy access[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 148-155.
- [2] 胡雪峰,王璐,龚春英,等. 可再生能源并网发电馈网电流中的谐波分析及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(增刊1): 167-170.
HU Xuefeng, WANG Lu, GONG Chunying, et al. Harmonic analysis and suppression strategies of grid current for renewable energy grid integration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(S1): 167-170.
- [3] 郭小江,马世英,申洪,等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 107-115.
GUO Xiaojiang, MA Shiying, SHEN Hong, et al. HVDC grid connection schemes and system stability control strategies for large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 107-115.
- [4] 汪宁渤,丁坤,陟晶,等. 风电火电打捆联合外送是解决风电市场瓶颈的有效途径[J]. 电力技术, 2010, 19(13): 1-4.
WANG Ningbo, DING Kun, ZHI Jing, et al. The transmitted of combined electricity generated from wind and thermals is an effective way to solute the market bottleneck in wind power development[J]. Electrical Power Technology, 2010, 19(13): 1-4.
- [5] 黄学良,刘志仁,祝瑞金,等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
HUANG Xueliang, LIU Zhiren, ZHU Ruijin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [6] 薛志英,周明,李庚银. 大规模风电接入电力系统备用决策评述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4):

- 148-155.
XUE Zhiying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on reserve decision of power systems with large scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 148-155.
- [7] 郭小江, 郭强, 马世英, 等. 直流孤岛送电系统的系统接入技术要求研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 42-49.
GUO Xiaojiang, GUO Qiang, MA Shiyong, et al. Research on system interconnection requirements of DC island sending system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 42-49.
- [8] 孙士云, 束洪春, 于继来. 单相重合时序对特高压交流直流并联系统暂稳影响的机理分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 106-113.
SUN Shiyun, SHU Hongchun, YU Jilai. Mechanism analysis of single-phase reclosure sequence's influence on ultra-high voltage AC/DC parallel system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 106-113.
- [9] 林卫星, 文劲宇, 程时杰, 等. 一种将风电场和常规电厂捆绑并网的三端直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 16-26.
LIN Weixing, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. A three terminal HVDC system to bundle wind farms with conventional power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 16-26.
- [10] WEN Zhiwei, HE Shien. Comparative analysis on critical clearing time of power system connected with large wind farm[C] // The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing: IEEE PES, 2011: 88-92.
- [11] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 7-11.
HAO Zhenghang, YU Yixin. The influence of doubly-fed induction generator on stability of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 7-11.
- [12] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, PARSONS B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 29-36.
- [13] 盛超, 曾杰, 郝正航, 等. 含双馈风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 133-137.
SHENG Chao, ZENG Jie, HAO Zhenghang, et al. Analysis of transient stability power systems with DFIG-based wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2012, 24(1): 133-137.
- [14] 林俐, 杨以涵. 基于绕线式异步发电机的风电场并网暂态稳定机理分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 102-106.
LIN Li, YANG Yihan. Transient stability analysis of grid-connected wind farm with wound rotor induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 102-106.
- [15] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, PARSONS B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 29-36.
- [16] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [17] KO H S, YOON G G, KYUNG N H, et al. Modeling and control of DFIG-based variable-speed wind-turbine[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1841-1849.
- [18] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风电机组机电耦合与轴系稳定的分析与辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 134-139.
HAO Zhenghang, YU Yixin. Analysis and identification for electromechanical coupling and shaft stability of doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 134-139.

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-05-19

作者简介:

李生福(1986-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

张爱玲(1968-), 女, 教授级高工, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

李少华(1982-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制, 特高压直流输电等;

郝正航(1972-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为风力发电、微电网、柔性直流输电、电力系统稳定分析与控制。E-mail: haozhenghang@163.com