引风机高压变频器在发电机组实现FCB功能的应用

火电厂中机组快速甩负荷（FCB）功能是大型机组不可缺少的安全保障。在实际应用中对整个锅炉系统的炉膛压力控制是实现FCB功能的关键点，而锅炉引风机对于炉膛压力调节起到至关重要的作用。当分布式控制系统（DCS）触发FCB功能时，炉膛压力PID调节器输出锅炉引风机目标速度，实现快速制动功能。介绍级联型高压变频器应用于电厂引风机，FCB快速制动功能的实现原理及控制方式，通过电厂实际运行工况测试验证级联型高压变频器FCB快速制动功能满足设计需求，能有效保障机组安全可靠运行。

季爱晖/宝钢工程技术集团有限公司
蔡　准/苏州汇川技术有限公司

季爱晖/高级工程师

关键词/Keywords
FCB·
高压变频器·
锅炉引风机·
炉膛压力PID调节·

0　引言

某钢厂自备电厂1#、2#发电机组均为日本三菱重工制造的亚临界参数、一次再热及强制循环汽包炉350 MW的锅炉机组，锅炉燃料主要为煤和高炉煤气（BFG）。每台机组原装设4台离心式引风机，现采用“引增合一”方案进行改造，改造后1#、2#机组各设3台双吸离心式引风机，电动机电压为6 kV，额定功率为2 900 kW，由高压变频器驱动，为3台并联运行方式。与常规电站锅炉引风机不同的是，由于掺烧高炉煤气与厂用电限制，需要设置3台引风机，而3台引风机的锅炉最大连续蒸发量（BMCR）点不同。设计已考虑同时适应3台风机运行工况与2台风机运行工况，在两种工况下均处于高效区且不进入不稳定工作区间。因此与高压变频器在常规风机泵类负荷上应用不同的是，此次改造对于引风机变频器加减速时间要求非常严格，要求变频器自身具备快速加减速功能，以满足电厂1#、2#机组FCB功能[1]。

FCB功能是指当电网系统发生故障时，发电机系统能够快速甩负荷至5%或者0%负荷，维持锅炉、汽轮机和发电机的安全运行，即机组从一个较高负荷稳定运行工况到一个极低负荷运行工况；此时对锅炉主要辅机、汽轮机的调节要求极高[2]。对于引风机而言，则需要在FCB功能触发时，能够实现引风机转速的快速可控调节（主要是快速降速降低风量，减小负荷），控制锅炉炉膛压力，保持锅炉稳定运行而不触发锅炉MFT。因此，高压变频器应用于这种工况时，需要具备快速制动的能力。

通常两象限变频器应用在快速制动的场合，如果变频器不作任何处理，将会因为电动机发电能量回馈造成功率单元母线电压升高，以致造成功率单元母线过电压故障。通常的做法是在功率单元内部加装制动装置，吸收电动机发电能量。在功率单元内部加装制动刹车装置，大大增加系统的复杂性，成本、体积也大大增加，另外，由于变频器本身是高压系统，功率单元内部加装制动刹车装置后，系统的绝缘及可靠性也是很大的问题。另一种做法是在电动机定子侧注入高频信号，其内部由于趋肤效应，导致电动机内阻增加，这种方式通过增加电动机内部损耗将电动机发电能量消耗在其绕组内部，也称为叠频制动[3]的方法，该方法在叠频制动过程中，电动机发热会很严重，转矩脉动大，噪声也大，频繁使用双频制动，有电动机绕

组烧坏的风险。

除了上述两种在两象限变频器基础上的优化方案外，还可以使用四象限变频器方案，FCB制动信号有效后，将引风机快速制动产生的能量回馈到电网，这种做法功率单元为“背靠背”结构，功率器件数量增加一倍，成本增加，系统控制复杂。引风机在正常工作时，大部分运行工况电动机处于电动状态，不回馈能量到电网。使用带能量回馈功能的四象限变频器，相对两象限变频器而言其性价比非常低。

本文提出了高压变频器能耗制动的实现方案，在高压变频器与电机之间，并联能耗制动电阻，在系统FCB快速制动命令有效后，能耗制动电阻接入，达到系统快速制动的目的，相对于在功率单元内部加装制动吸收装置而言，其可靠性更高。相对于四象限变频器而言，其可靠性及性价比更高。特别适用于对变频器有快速制动需求的场合。

1 高压变频器原理及FCB功能实现

高压变频器主回路主要采用了功率单元串联型结构[4]。功率单元串联型多电平高压变频器是广泛应用的高压变频器，如图1所示，其输入侧通过移相变压器移相隔离，降压得到多组低压三相交流电，每组三相低压交流电接入不同功率单元（如A_1～A_5单元、B_1～B_5单元及C_1～C_5单元），并经功率单元整流滤波、逆变后输出串联，得到高压交流驱动高压电动机，其中每一功率单元通过功率单元控制板控制运行。

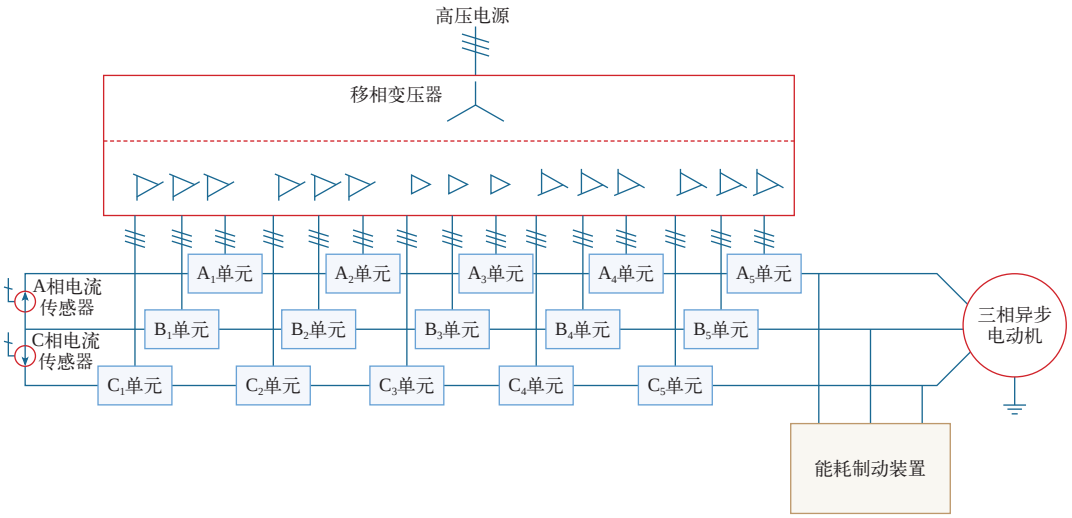

图1 高压变频器实现FCB功能原理

FCB快速制动功能实现的方法是在变频器三相输出侧并联三相制动电阻，三相制动电阻为星形联结，能耗制动装置内部结构如图2所示。QS为制动装置的隔离刀开关，高压变频器正常运行时，QS处于闭合状态；KM为制动电阻自动投入的接触器；R为能耗制动电阻；两相电阻支路电流霍尔采样，用于检测制动电阻支路电流。

高压大功率电动机通常系统惯性大，根据运动方程

$$T_{\mathrm{M}}-T_{\mathrm{f}}\left(\frac{n}{n_{\mathrm{e}}}\right)^{2}-F\frac{n}{9.55}=\frac{GD^{2}}{375}\times\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} \qquad (1)$$

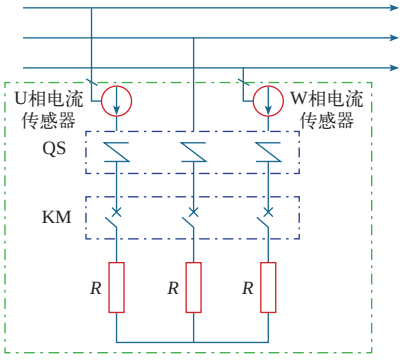

图2 能耗制动装置内部结构

式中，$GD^2=4gJ$，J为转动惯量大小，单位为kg·m^2，GD^2为飞轮转矩，其中G为物体质量，单

位为kg，D为物体的直径，单位为m；T_M为电磁转矩；T_f为额定转速n_e时的负荷转矩；F为摩擦系数；n为当前转速，单位为r/min。

能耗制动时，制动转矩计算公式为

$$T_M = 9.55 \times \frac{U_N^2 n}{R n_e^2} \tag{2}$$

式中，U_N为电机额定电压；R为制动电阻阻值。

由运动方程推导得到制动时间表达式为

$$\mathrm{d}t = \int_{n_e}^{n_{BP}} \frac{GD^2}{375} \times \frac{\mathrm{d}n}{T_M - T_f\left(\frac{n}{n_e}\right)^2 - F\frac{n}{9.55}}$$

$$= \int_{n_e}^{n_{BP}} \frac{GD^2}{375} \times \frac{\mathrm{d}n}{-9.55 \times \frac{U_N^2 n}{R n_e^2} - T_f\left(\frac{n}{n_e}\right)^2 - F\frac{n}{9.55}} \tag{3}$$

式中，n_{BP}为能耗制动目标转速。

根据系统所要求的最快制动时间dt，计算得到制动电阻阻值及功率大小。

能耗电阻的最大功率为

$$P_{max} = \frac{U_N^2}{3R} \tag{4}$$

FCB快速制动逻辑时序如图3所示。高压变频器运行时，当系统出现故障，炉膛压力变化到一定值后，控制系统输出FCB紧急制动信号，炉膛压力PID调节输出锅炉引风机目标速度。当变频器判断运行频率与目标频率之差大于频率阈值时，制动电阻接触器KM合闸，制动电阻接入，高压变频器控制系统转入能耗制动模式工作。当判断运行频率与目标频率之差小于频率阈值时，制动电阻接触器KM分闸，制动电阻切除，高压变频器控制系统转入正常变频工作模式，FCB快速制动过程结束。

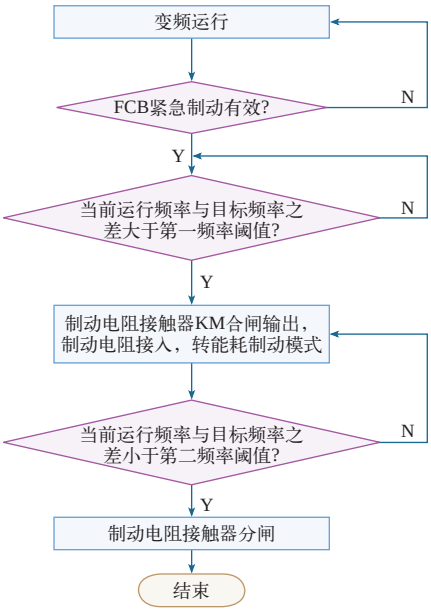

图3　FCB快速制动逻辑时序

2　试验结果

引风机电动机参数为：额定功率2 900 kW，额定电压6 kV，额定电流323 A；配置的高压变频器容量为4 100 kV·A，额定电流395 A，整机5单元串联输出6 kV高压，功率单元输入电压为690 V。设计要求FCB快速制动从100%转速到30%转速，制动时间不大于28 s。

起动高压变频器运行至50 Hz额定频率，变频器接收到外部FCB紧急制动命令，并处于等待快速制动状态，检测到目标频率变化后，控制系统发出制动电阻接触器KM合闸信号，变频器控制系统为转能耗制动模式。实测FCB功能触发如图4所示，从50 Hz制动到15 Hz，整个快速制动过程时间为21 s，满足小于28 s的要求。

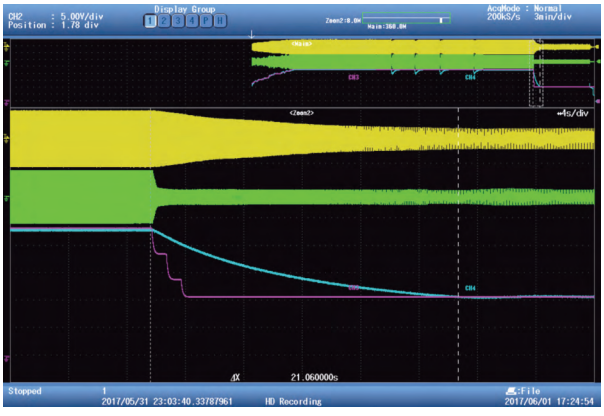

图4　FCB从50.00 Hz快速制动到15.00 Hz的过程，用时21 s

图4中，通道1为输出电压波形，通道2为输出电流波形，通道3为FCB目标频率波形（1.0 V表示10%），通道4为变频器输出频率波形（1.0 V表示10%）。

(下转第68页)

出电压变化要求一样，电网质量也必须满足图8绿色包络区域的电压变化要求。

自然冷却在数据中心空气调节系统的应用正如火如荼。类比自然冷却，UPS系统ECO模式可以冠之以“自然关键性供电”的称谓。自然冷却的思想是当自然环境的温湿度满足数据中心IT设备的运行环境要求时，关闭空气调节系统而使用环境空气作为冷源。目前，自然冷却的研究已经相当深入，不仅可以绘制出应用自然冷却的气象地图，还可以统计出各地应用自然冷却的全年时间。和自然冷却的思想如出一辙，自然关键性供电也仅取决于外部因素（除了穿越时间之外）。

大多数数据中心都安装了电能表，除了可以用来监控市电的电压波动、相角差异和频率变化等基本参数外，还可以为数据中心的PUE计算提供数据。这些数据应该被实时记录并被保存起来形成电压波动的曲线，统计出全年可以使用ECO模式运行的时间。当然，这些数据也可以从当地电力公司获取，美国在这方面就已经走在了业内的前列。

所以，如果可以确定电网质量，同时保证UPS切换时间和电源供应器穿越时间的一致性，那么ECO模式运行的节能效益就可以完整地确定并计算出来。

4 结束语

绿色网格组织对UPS系统ECO模式的能效分析给出的结论是比正常模式的能效高出4.3%；对UPS系统应用ECO模式的数据中心而言，其PUE可降低0.04～0.11。但是能否实施UPS系统ECO模式还取决于两个先决条件：

1）电网质量能否满足IT设备的电力运行要求。

2）UPS系统的切换时间是否和电源供应器的穿越时间相匹配。

UPS的ECO模式运行与空气调节系统的自然冷却具有相似的节能思想，可以称之为供电系统的自然关键性供电，自然冷却的方法论可以在自然关键性供电领域加以升华应用。

在现有的UPS系统和IT设备有关的技术条件下，制定UPS系统ECO模式运行的有关规范与标准具有重要意义，不仅可以统一不同UPS厂家对ECO模式运行的认识，而且对IT客户正确实施UPS系统ECO模式运行和评估ECO模式运行的风险具有明确而客观的指导意义。

（收稿日期：2017－04－07）EA

(上接第63页)

3 结束语

该自备电厂1#、2#机组改造后成功投入运行，对原有引风机的变频改造后，有效满足FCB功能需求；在正常运行情况下通过变频器驱动引风机达到节能效果，当变频器故障时可以可靠切到工频，满足高可靠性前提条件下的经济性最优。当电网系统或发电机组出现异常时，DCS监测炉膛负压到一定值后，给变频器发FCB信号，变频器执行快速制动控制逻辑，经现场试验验证快速制动功能在引风机上FCB功能的有效应用，为防止锅炉主燃料跳闸（MFT）提供了强有力的保障。

参考文献

[1] 吴永存，朱介南．宁海电厂1 000 MW机组RB与FCB控制策略的设计和应用 [J]．电力建设，2011，32 (1)：59-63.

[2] 朗坤．汽轮机系统FCB过程机理建模及控制策略研究 [D]．吉林：东北电力大学，2016：15-25.

[3] 陈启江．电机调速系统双频制动方法的研究 [J]．企业导报，2012 (4)：261-262.

[4] 李晔，余时强，朱宗晓，等．单元串联多电平中压变频器的研制综述 [J]．电气传动自动化，2002，24 (2)：3-7.

（收稿日期：2017－04－07）EA