

基于高压调功器的冲击负荷平衡研究

黄华, 丁勇, 常宝立, 陈赤汉

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102)

摘要: 针对工业轧机、电弧炉等冲击性负荷运行时, 有功功率波动幅度大且频次密集的问题, 提出采用高压调功器(HVPR)来镜像平衡冲击负荷造成的功率波动, 维持电网频率稳定。文中介绍了高压调功器的组成和控制原理, 冲击负荷平衡控制策略, 并通过PSCAD/EMTDC仿真软件对调功器的功率控制进行验证, 最后给出了现场冲击负荷平衡试验波形。

关键词: 高压调功器; 冲击负荷平衡; 晶闸管阀组

中图分类号: TM711

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0063-03

钢铁企业由于存在大量的轧机、电弧炉等冲击性负荷, 正常生产时系统总负荷会出现幅度大、频次密集的有功功率波动, 导致系统频率也出现大幅度波动, 会对附近发电机组的电磁转矩造成影响, 严重情况下, 电弧炉冲击会引起发电机组内部谐振, 造成机组长期疲劳损伤, 冲击负荷还会对网架结构较为薄弱的地区电网的安全稳定运行产生不利影响^[1-4]。为避免冲击负荷对发电机组和电网系统造成的不利影响, 文献^[5]建立了有功冲击动态控制模型, 通过实时计算电网的有功冲击承受能力, 对随机的冲击负荷进行错峰控制, 避免冲击负荷的瞬变叠加放大, 破坏电网稳定, 这种方案不可避免地会对日常生产造成干扰。

本文提出采用高压大容量调功器来镜像平衡(镜像平衡是指任一时刻, 调功器功率和冲击负荷功率一升一降, 两者功率之和平衡在某一恒定功率)冲击负荷造成的功率波动, 高压调功器基于晶闸管三相交流调压原理^[6], 通过改变晶闸管的触发角度, 来改变热水锅炉的三相输入电压, 从而无级调节锅炉消耗功率, 使锅炉功率与冲击负荷功率镜像对称, 达到总负荷稳定, 避免了系统频率的剧烈波动。

1 调功器组成与控制策略

根据测算, 1 min内钢厂所有冲击负荷的最大功率波动约150 MW, 单套高压调功器容量40 MW, 共有4套调功器, 接入10 kV母线。高压调功器由晶闸管阀组、负载电感、滤波器、热水锅炉组成, 如图1所示。阀组由一定数目的反并联晶闸管(VT₁和VT₂)串联组成, 晶闸管阀组与负载电感L₀三相串联, 负载电感出线接额定功率为40 MW的热水锅炉, 负载电感的作用是减小高压调功器运行中产生的谐波, 降低阀组开通时的电流上升率。为了避免高压调功器运行中产生的谐波流入系统, 配置由L₁, C₁组成的5次滤波器和L₂, C₂组成的7次滤波器。

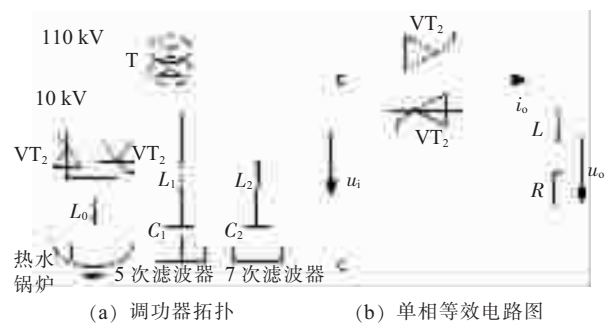


图1 高压调功器拓扑及等效电路图

高压调功器与静止无功补偿器(SVC)相比, 虽然都是基于三相交流相控调压原理, 但有着本质上的区别。SVC是按三相角形接线, 它既可以对负荷无功进行补偿, 使得补偿后的系统无功为0, 也可以对母线电压进行控制, 维持电压稳定^[7,8]; 而高压调功器是按三相星形接线, 通过调节晶闸管阀组的导通角度来调节热水锅炉的输入电压, 从而调节热水锅炉消耗的功率, 也即调功器只能吸收有功, 对负荷有功进行镜像平衡, 使得系统有功平衡在某一恒定功率, 达到频率稳定的目的。由于热水锅炉是纯阻性负载, 因此可以用电阻来等效, 得到的高压调功器的单相等效电路图, 如图1(b)所示。

设输入电压 $u_i = \sqrt{2} U_i \sin \omega t$, 则输出电压有效值:

$$U_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} (\sqrt{2} U_i \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_i \sqrt{\frac{\theta}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha - \sin(2\alpha+2\theta)}{2\pi}} \quad (1)$$

式(1)中: α 为晶闸管阀组的触发角; θ 为晶闸管阀组的导通角; 且 α 与 θ 所示关系^[1]:

$$\sin(\theta + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\theta}{\tan \varphi}} \quad (2)$$

式(2)中: $\varphi = \arctan(WL/R)$ 为负载阻抗角。

由式(1)、式(2)可知, 输出电压有效值与导通角和触发角相关, 而导通角与触发角的关系是一个非线性超越方程, 因而输出电压与触发角之间没有确定的函数关

系,因此在确定的负载阻抗角下,通过数值法求解出调功器的功率与触发角的关系,如表 1 所示。

表 1 不同触发角下的负荷功率

触发角 / (°)	触发角 / rad	有功功率 / MW
30	0.52	39.271
36	0.63	37.767
42	0.73	35.678
48	0.84	33.228
54	0.94	30.085
60	1.05	26.009
66	1.15	23.138
72	1.26	19.805
78	1.36	16.496
84	1.47	12.982
90	1.57	10.335
96	1.68	7.701
102	1.78	4.717
108	1.88	3.138
114	1.99	1.952
120	2.09	0.796

对表 1 中的数据进行曲线拟合,得到负荷功率(标么值,基准值为 40 MW)与触发角的函数关系:

$$\alpha = f(P) = -13.27P^5 + 33.94P^4 - 32.92P^3 + 15.11P^2 - 4.586P + 2.173 \quad (3)$$

利用式(3)的拟合函数,便可以快速根据高压调功器功率指令计算出晶闸管阀组的触发角度,使得高压调功器的实际功率快速跟踪功率指令的变化。为了对曲线拟合计算出的触发角误差进行补偿,将高压调功器的功率测量值 P_{meas} 与指令值 P_{ref} 做差后进行积分调节,积分调节器输出的闭环触发角指令 α_{cl} 与拟合函数计算出的开环触发角指令 α_{op} 相加,作为最终的触发角度,如图 2 所示。通过 $f(P)$ 函数保证控制的快速性,通过积分调节保证控制的准确性。

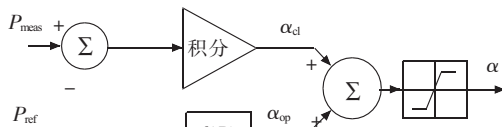


图 2 高压调功器控制框图

2 冲击负荷平衡控制策略

冲击负荷平衡控制策略就是通过对各路冲击负荷进行采样,按下式所示的冲击平衡算法计算出高压调功器的功率指令 P_{ref} :

$$P_{\text{ref}} = P_b - \sum_{i=1}^n (P_i - P_{i,\text{mean}}) \quad (4)$$

式(4)中: P_i 为冲击负荷功率瞬时值; $P_{i,\text{mean}}$ 为冲击负荷功率平均值; P_b 为高压调功器的功率基准值。

冲击负荷平衡示意图如图 3 所示。当冲击负荷功率突然增大时,高压调功器功率快速减小;冲击负荷功率突然减小时,高压调功器的功率快速增大,维持系统总负荷功率保持稳定,避免频率大幅波动。

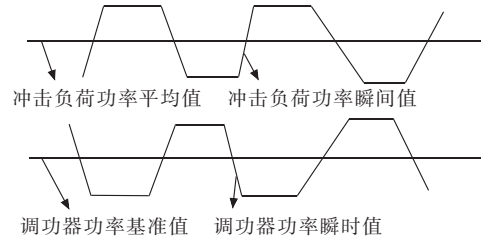


图 3 冲击负荷平衡示意图

通过对各种轧机、精炼炉等冲击负荷功率波动曲线的研究发现,各种冲击负荷的波动范围较为固定,负荷平均值变化不大,可事先人为设定,因此分别计算各个负荷的实际功率值与功率平均值的偏差量,并将这些偏差量求和,作为总的功率偏差量用于调整高压调功器的出力,叠加高压调功器功率基准值后,就是高压调功器的实际出力指令值,其控制逻辑框图如图 4 所示。

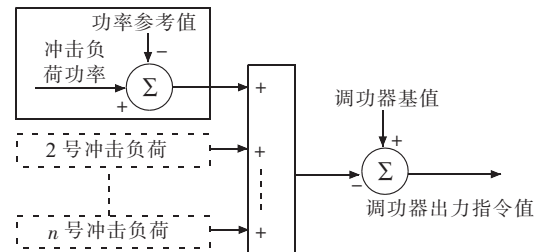


图 4 冲击负荷平衡控制框图

对于冲击负荷的运行和停止状态,采用负荷功率值+延时进行判断。当负荷投运时,将负荷平均值设置为设定值;当负荷停运时,将负荷平均值设置为 0,以提高系统的经济性。

3 仿真验证

利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了容量为 40 MW 的高压调功器仿真系统,降压变压器容量 50 MV·A,110/10 kV,短路阻抗百分比为 10.5%,负载电感 2 mH,额定容量为 40 MW 的热水锅炉用 2.5 Ω 的电阻来等效,5 次滤波器容量为 10 Mvar,电容大小 313.92 μF,串联电感 1.31 mH,7 次滤波器容量为 5 Mvar,电容大小 156.95 μF,串联电感大小 1.33 mH。

高压调功器功率指令从 0 MW 阶跃到 40 MW 时调功器的电压有效值、瞬时电流及功率波形如图 5 所示。经过 10 ms 时间,调功器功率就从 0 MW 阶跃到 40 MW,且无超调,10 kV 母线电压波动是由调功器功率阶跃时吸收的无功功率变化导致,该电压波动在允许范围之内,由此证明了采用基于晶闸管的三相交流调压原理的高压调功器来平衡冲击负荷的可行性。

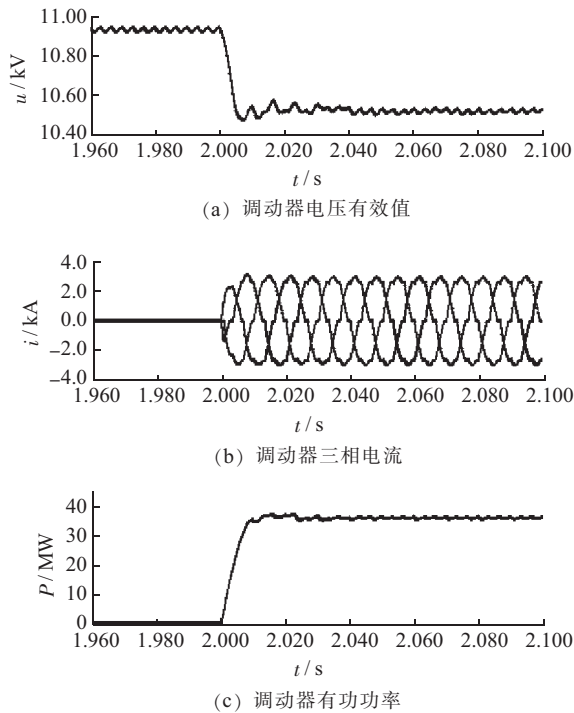


图5 高压调功器阶跃响应试验

4 试验验证

利用高压调功器去平衡钢厂内 2150 主传动生产线上的冲击负荷,冲击负荷波动范围为 0 到 50 MW,冲击负荷平均值 25 MW,设置高压调功器基值 35 MW,高压调功器最大出力 70 MW,平衡效果如图 6 所示。高压调功器对冲击负荷的波动功率进行了镜像平衡补偿,平衡后的总负荷功率曲线为一平滑的直线,达到了冲击负荷平衡的效果。

5 结束语

针对工业轧机、电弧炉等冲击性负荷运行时,有功功率波动幅度大且频次密集的问题,提出采用高压调功器来镜像平衡冲击负荷造成的功率波动,维持电网频率稳定。通过 PSCAD/EMTDC 仿真和现场冲击负荷平衡试验波形验证了基于高压调功器的冲击负荷平衡方案的正确性。

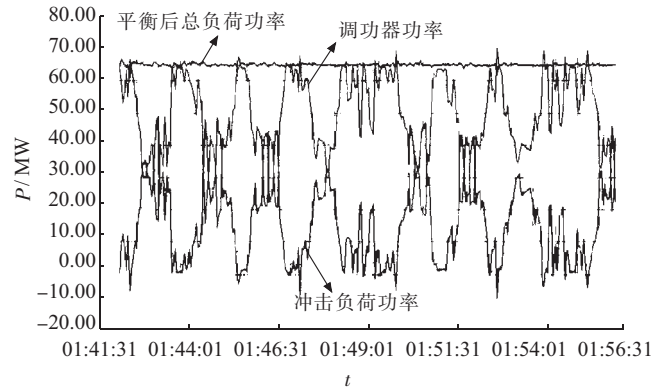


图6 冲击负荷平衡试验波形

参考文献:

- [1] 王建学,高卫恒,别朝红,等.冲击负荷对电力系统可靠性影响的分析[J].中国电机工程学报,2011,31(10):59-65.
- [2] 彭 卉,邹 舒,付永生,等.冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):54-61.
- [3] 刘丽霞,岑海凤,李晓辉,等.天津电网大容量冲击负荷对邻近发电机组影响的仿真研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(20):43-47.
- [4] 高 超,程浩忠,李宏种,等.大容量冲击负荷对地区电网暂态稳定性影响[J].电网技术,2008,32(1):31-35.
- [5] 叶海燕,宋明中,李振锋.区域电网有功冲击负荷动态控制系统开发[J].宝钢技术,2012(5):77-80.
- [6] 陈 坚.电流电子学—电流电子变换和控制技术[M].北京:高等教育出版社,2003:219-225.
- [7] 王云洁,胡 骏.SVC 电压稳定控制和抑制低频振荡交互影响研究[J].江苏电机工程,2013,32(1):23-25.
- [8] 黄 峰.静止无功补偿系统非线性最优控制器设计[J].江苏电机工程,2012,31(5):58-61.

作者简介:

- 黄 华(1984),男,江苏南通人,工程师,研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用;
- 丁 勇(1981),男,江苏南通人,工程师,研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用;
- 常宝立(1981),男,河北唐山人,工程师,研究方向为电力系统稳定
分析;
- 陈赤汉(1962),男,陕西西安人,工程师,研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用。

Research of Impact Load Balancing Based On High-voltage Power Regulator

HUANG Hua, DING Yong, CHANG Baoli, CHEN Chihan
(Nari-Relays Electric Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to cope with the problems of large amplitude fluctuation and intensive frequency of active power brought by impact load, such as industrial mill and electric-arc furnace, high-voltage power regulator is used to maintenance frequency stability. The composition and control scheme of high-voltage power regulator and the control strategy for impact load balancing are introduced. Finally, simulations are implemented in PSCAD/EMTDC to validate the control strategy of high-voltage power regulator.

Key words: high-voltage power regulator; thyristor valve; impact load balancing