

炼钢电弧炉的运行特性与电压闪变抑制

翁利民, 张 莉

(武汉市钢铁设计研究总院 电力室, 湖北 武汉 430080)

摘要: 对炼钢电弧炉电压波动与电压闪变这一主要干扰进行了定性分析, 详细地介绍了几种抑制方法, 指出 SVC 是现阶段抑制其不利影响的实际应用最广、最有效和最经济的措施之一。还对配电用静止补偿器与有源滤波器作了概述, 以形成一个对电弧炉电压闪变等干扰进行综合补偿的完整概念。

关键词: 电能质量; 电压闪变; 电压波动

中图分类号: TF748.41

文献标识码: A

文章编号: 1002-1639(2004)06-0052-03

Suppression Research of Voltage Fluctuation & Operation Characteristics of Electric Arc Furnace

WENG Li-min, ZHANG Li

(Wuhan Iron & Steel Design & Research Institute, Wuhan 430080, China)

Abstract: Steel-making electric arc furnace will produce harmonics, voltage fluctuation and flick, unbalance of three phase, low power factor. The article analyzes its actual typical cases and operating specialties, introduces several restraining measures in detail. SVC is the most economic, effective method. To improve the technics of steel-making furnace, optimize the design parameter, choose supply power in reason will weaken adverse influence of arc furnace. The paper summarizes DSTATCOM and APF. These will be favor to understand the integrity compensation conception, and developing direction of restraining methods.

Key words: power quality; voltage flicker; voltage fluctuation

1 前 言

广泛应用于现代钢铁企业的炼钢电弧炉等冲击性非线性负荷的波动电流, 当其流过供电线路阻抗, 将使供电电压出现相应的波动。此波动电压将传递到电网其他馈出线路上危害其他用户的电气设备, 严重地影响电炉自身的产量与质量, 并使得电网电能质量严重恶化, 电网损耗增大, 从而成为电网迫切需要“综合治理”的问题。

电压波动是指电网电压方均根值的一系列变动或连续的改变, 其值 d 常以调幅波的相邻的极值 U_{\max} 和 U_{\min} (均为方均根值)之差 ΔU 相对额定值 U_N 的百分比表示

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% \quad (1)$$

电压闪变, 其本意是指由于电光源供电电压小幅度的快速变化导致电光源输出照度的闪烁对人眼所产生的不良刺激的现象。近年来, 由于精密仪器、计算机、电子生物、医疗器械及家用电器的普及与应用, “闪变”一词的含义得到拓宽, 包含了电源电压的变化对这些敏感设备所产生的不利影响。

电压的闪变是电压波动的一种特殊反映, 闪变的严重程度必将与负荷变化引起的电压变动相关。电压变动量遵循下面规律

$$\Delta U\% = \frac{\Delta PR + \Delta QX}{U_N^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 为供电母线上电力负荷有功和无功变化量, MW、Mvar; R 、 X 为从电源到供电母线的等值电阻和电抗, Ω ; U_N 为母线额定电压, kV

在电力系统中, 由于 R 远小于 X , 故有

$$\Delta U\% \approx \Delta Q \frac{X}{U_N^2} \times 100\% = \frac{\Delta Q}{S_k} \times 100\% \quad (3)$$

式中: S_k 为供电母线上的三相系统短路容量。

式(3)表明, 电压闪变是由于大型电力负荷尤其是无功负荷的剧烈变动所致。纵观目前工业大型用电设备, 不难发现, 炼钢用电弧炉是产生电压波动与闪变的主要根源, 由于电弧炉用电负荷大、供电电压高, 它所引起的程度较重且影响面大。

2 电弧炉运行特性

2.1 供电特性

电弧炉冶炼时的负荷由电弧炉变压器专门供给。超高功率电炉变压器原边多为 33 kV 或 35 kV 电压, 副边电压一般只有几百伏, 而电流可达几千安至几百千安。为适应电弧的特性, 电炉变压器原边有多个抽头, 使副边电压在 100 ~ 700 V 间可调, 切换电炉变压器抽头即可调节电弧电压的大小。三相石墨电极插入炉内, 通过电极升降装置可上下调节, 从而调节电弧电流的大小。

由于交流电弧的固有特性, 为使电弧稳定, 电弧炉供电回路中必须具有一定的电抗。以电炉变压器额定容量为基准, 此电抗的阻抗压降通常为 30% ~ 40%。在小容量电弧炉系统中, 常需为此设置串联电抗器。对于 10 MVA 以上变压器供电的大容量电弧炉, 电炉变压器本身

收稿日期: 2004-07-08; 修回日期: 2004-09-03

作者简介: 翁利民(1969-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 从事电力系统电压稳定与电能质量的研究。

已具有了相当的电抗值,故不必另外串联电抗器。这个电抗在稳定电弧的同时,也限制了电极端短路时可能产生的最大短路电流,因而对闪变的大小亦有重要影响。

2.2 冶炼过程与电压闪变

电弧炉的冶炼过程依据其电气特性分为两个阶段:熔化期和精炼期。

(1) 熔化期 炉内废钢装入后,炉盖封闭,同时插入三相电极。接通三相工频电源,则在电极与废钢之间产生工频大电流电弧,利用电弧热量开始熔化废钢。

由于废钢与电极间存在直接电弧,随着废钢的熔化必然引起电弧长度的变化,进而导致燃弧点的移动,电弧会极不稳定。在初始熔化期间,由于炉内温度较低,电弧维持困难,电弧频繁地时起时灭,电流断续;随着熔化的进行,电极逐渐下降,废钢的熔化是从下部先开始的,下部废钢熔化后,上部的钢块不稳定,于是纷纷落下,引起电极端突发的两相短路,电弧电流出现了急剧的大幅度变化。

电弧电流的变动引起了电压闪变。由于燃弧点的移动导致电弧快速变动称周期闪变,由于电极短路引起的急剧变动称之为非常闪变。冶炼中,电弧电流变化的程度与废钢的大小有关,若熔材为轻质小块,电弧相对稳定,闪变问题相对轻些;落下时会引起电极短路,这时候的闪变问题相对严重。熔化中期过后,炉底有了相当的钢液,电弧相对稳定,闪变程度大大减轻。

(2) 精炼期 熔化完成后,边升温加入铁矿石和氧,以便进行氧化精炼。之后,对钢渣进行还原性精炼,加石灰等进行脱硫、脱氧。这一时期,电弧非常稳定,电流也不变动了,闪变问题基本消失。

2.3 电弧炉的电气特性

电弧炉是一个激烈变动的负荷,尤其是在熔化初期,电流变动的范围常达到电炉变压器额定电流的 0 ~ 300%,其电气特性主要表现为以下四个方面:

(1) 电压闪变和波动

电弧炉是电网很大的负载,而且在运行中经常产生突然的、强烈的电流冲击,导致电网电压的快速波动,频率为 0.1 ~ 30 Hz。其中特别是频率在 1 ~ 10 Hz 之间的电压波动会引起照明白炽灯和电视画面的闪烁,使人们感到烦躁,即上面提到的“闪变”。一般地,随着电弧炉电流的增加,无功功率 Q 急剧增大,即在电弧炉冶炼过程中,电弧电流快速地大幅度变化,必将引起从电力系统吸收的无功功率的剧烈变动。按照式(3),电弧炉运行必将在电力系统公共母线上产生严重的电压波动和闪变,这是电弧炉的主要电气特性。

(2) 功率因数低

电弧炉从电网获得电能,其中一部分转化为有用的热能,而另一部分则为无功能量。为了使电弧能稳定燃烧,电弧炉的功率因数不能取得太高。因电弧炉负载是高感性的,电弧炉的接入使供电电网的功率因数恶化。超

高功率电弧炉运行在熔化期时,功率因数甚至低到 0.1,这样引起母线电压严重降低。电压降低又相应降低电弧炉的有功功率,使熔化期延长,生产率下降。

(3) 负序分量

电炉在熔化期,各相电弧电压是独立变化的,三相电弧各自发生急剧无规则变化,故其三相电流是不对称的。在正常生产情况下产生的负序电流约为电炉变压器额定电流的 25% 左右;在不正常情况下,如一相断弧时,可达 56% 左右,如两相短路的同时,第三相又断弧,此时可达 86% 左右,负序电流流入电网,使电网电压产生负序分量,影响用电设备使用效果,严重时可能造成损坏,还会使继电保护误动作。

(4) 高次谐波

交流电弧炉在炼钢过程中其电流会产生非正弦畸变和高次谐波,对电网造成干扰。电弧炉的谐波电流成份主要为 2 ~ 7 次,其中 2、3 次最大,其平均值可达基波分量的 5% ~ 10%,谐波电流流入电网,使电压波形发生畸变,引起电气设备发热、振动以及保护误动作等。

2.4 电压闪变的影响因素

实测表明,由电弧炉产生的电压闪变,其频谱范围集中在 1 ~ 10 Hz,且其频率分量的幅值基本上与其频率成反比。影响电压闪变的因素可分为电气因素与非电气因素。

电气方面的因素:系统短路容量越大,电弧炉在系统母线上产生的电压波动和闪变越轻;电弧炉回路阻抗越大,电弧电流变化越小,闪变越轻;电弧炉有功和无功的变动量及其变化频度。在同一频度下,功率变动量越大,闪变越严重。

非电气方面的因素主要是:操作规程、炉子容量和熔化时间、有无废钢预热装置、是否吹氧、废钢的材质、形状及装入顺序等。

3 抑制措施

3.1 改进炼钢工艺、优化设计参数

(1) 电弧炉炼钢时产生大量的高温烟气可用于预热废钢料,电弧炉安装废钢预热装置后,可将废钢料在装炉前预热到 700 °C 左右。在高温下,一部分不导电的杂质被除掉,废钢变软且电阻率变大,熔化期电弧相对稳定,引起的电压波动和闪变相对降低。即炼钢预热与连续加料,简称 Consteel 新技术,它是一种经济、实用的方法。

(2) 大块的废钢在电弧炉内不易熔化,而且容易短接电极造成短路使电弧不稳定,增大了无功冲击,增加了冶炼时间、降低了效率。因此,可采用废钢破碎和净化技术来降低生产成本,同时也降低了熔化期的电压波动和闪变。

(3) 一些发达国家的钢铁企业在熔化期喷入重油或天然气等辅助燃料,以此来降低炼钢综合成本。经过实测,这种炼钢工艺对降低电压波动和闪变有一定的作用,目前,我国在大容量超功率电弧炉上也开始采用这种炼钢工艺。

(4) 提高电极调节系统的灵敏度和快速性, 缩短响应时间; 充分考虑电极系统的固有共振性, 消除或减少机械共振对电弧炉特性的影响; 合理选择三相电极的极心圆直径, 提高电弧的稳定性; 提高电弧炉二次短网的功率因数等。

3.2 改进供电设备

(1) 应用较多的是串联空芯电抗器, 在电弧炉高压侧串联电抗器, 采用熔化期喷吹辅助燃料的措施, 可使电压波动和闪变降低 25%。

(2) 大容量的直流电弧炉近十年来在国外较为流行。直流电弧炉和交流电弧炉相比, 所产生的电压波动和闪变可降低 40 ~ 50% 左右; 不产生负序电流; 对二次短网和电极来说没有集肤效应; 二次侧可采用不同的接线方式。

另外, 采用高压专用直配线供电, 即在电弧炉附近设置电弧炉专用降压变电站; 或把电弧炉接到短路容量较大的电网上的措施也可有效地减小电压波动与电压闪变。

3.3 SVC 装置

SVC (Static Var Compensation) 装置是一种快速调节无功功率的装置, 已成功并广泛地用于电力、冶金、采矿和电气化铁道等冲击性负荷的补偿上, 在电弧炉抑制电压闪变中应用效果显著, 它可使所需无功功率作随机调整, 从而保持在电弧炉等冲击性负荷连接点的系统电压水平的恒定。

SVC 由可控支路和固定 (或可变) 电容器支路并联而成, 主要有四种型式:

(1) 可控硅阀控制空芯电抗器型 (称 TCR 型) 用可控硅阀控制线性电抗器实现快速连续的无功功率调节, 它具有反应时间快 (5 ~ 20 ms)、运行可靠、无级补偿、分相调节, 能平衡有功, 适用范围广, 价格便宜等优点。TCR 装置还能实现分相控制, 有较好地抑制不对称负荷的能力, 因而在电弧炉系统中采用最广泛。

(2) 可控硅阀控制高阻抗变压器型 (TCT 型) 优点与 TCR 型差不多, 但高阻抗变压器制造复杂, 谐波分量也略大一些。由于有油, 要求一级防火, 只宜布置在一层平面或户外, 容量在 30 Mvar 以上时价格较贵, 而不能得到广泛采用。

(3) 可控硅开关控制电容器型 (TSC 型) 分相调节、直接补偿、装置本身不产生谐波, 损耗小, 但是它是无级调节, 综合价格比较高。

(4) 自饱和电抗器型 (SSR 型) 维护较简单, 运行可靠, 过载能力强, 响应速度快, 降低闪变效果好, 但其噪音大, 原材料消耗大, 补偿不对称电炉负荷自身产生较大谐波电流, 无平衡有功负荷能力。

3.4 静止补偿器与 APF

配电用静止补偿器的工作原理与普通的 SVC 完全不同。它采用可关断的电力电子器件和基于坐标变换原理的瞬时无功理论进行控制, 是一种能够兼顾谐波滤波的

无功补偿装置。

静止补偿器与 SVC 相比, 有以下优点: 响应时间快, 对电压波动、闪变补偿率高, 可减小补偿容量, 体积小、重量轻, 消耗的材料少, 运行损耗小, 滤波效果好, 不受电网频率影响, 没有谐波放大作用和谐振问题运行稳定等。

静止补偿器中的逆变器, 一般采用脉宽调制 (PWM) 技术, 换流器件一般采用可关断晶闸管 (GTO) 或绝缘栅双极晶闸管 (IGBT), 静止补偿器对电压闪变有较强的抑制作用, 根据相关资料, 采用 IGBT 做换流器件组成的静止补偿器可使电压闪变降低 3.5 倍。

采用静止补偿器装置抑制闪变是目前最好的办法, 但由于目前大功率、快速的半导体元件制造在技术上还存在很多问题, 应用在大容量电弧炉上的静止补偿器还没有, 随着 GTC、IGBT 等电力半导体器件技术性能的不提高, 价格不断下降, 控制理论和控制器的不断完善, 静止补偿器在超高功率电弧炉上的应用将成为现实, 因此, 静止补偿器将是今后电力系统补偿装置发展的方向。

电压波动与闪变的抑制一般和高次谐波的抑制紧密相连, 现阶段用于配电网的无源滤波器虽然具有投资少、效率高、结构简单及维护方便等优点, 但由于滤波特性受系统参数影响大, 只能消除特定的几次谐波, 而对某些次谐波会产生放大作用, 甚至谐振现象等因素, 随电力电子技术的发展, 人们将滤波研究方向逐步转向有源滤波器 (Active Power Filter, 缩写为 APF)。

APF 即利用可控的功率半导体器件向电网注入与谐波源电流幅值相等、相位相反的电流, 使电源的总谐波电流为零, 达到实时补偿谐波电流的目的。它与有源滤波器相比, 有以下特点:

(1) 不仅能补偿各次谐波, 还可抑制闪变, 补偿无功, 有一机多能的特点, 在性价比上较为合理;

(2) 滤波特性不受系统阻抗等的影响, 可消除与系统阻抗发生谐振的危险;

(3) 具有自适应功能, 可自动跟踪补偿变化着的谐波, 即具有高度可控性和快速响应性等特点;

APF 作为改善电能质量的一项关键技术, 随着电力电子工业的发展, 器件的性价比将不断提高, APF 必然会得到更广泛应用。

4 结 语

对炼钢电弧炉的综合补偿是电网电能质量管理的一项重点, 通过改进炼钢工艺、优化设计参数与改进供电设备是抑制电压波动与电压闪变的最直接的方法, 它可以有效地提高电弧炉的经济效益; SVC 装置的应用已经在电弧炉综合补偿的实践中显示了技术上的优势和良好的效果, 减小对电网的不利影响, 相信 SVC 在保证冲击性非线性负荷安全经济运行中发挥它的巨大作用; 同时, 随着电力电子技术的进步与发展, 配电用静止补偿器将显

电熔镁炉相间电流耦合关系的分析

刘 刚, 刘 勇

(鞍山科技大学 高等职业技术学院, 辽宁 鞍山 114044)

摘要: 分析了电熔镁炉相间电流耦合的因素, 对其中的两种耦合因素进行了分析。给出了实测的相间电流耦合关系。研究结果为设计控制系统提供了依据。

关键词: 电熔镁炉; 相间电流; 耦合关系

中图分类号: TM924.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-1639(2004)05-0055-02

Analysis of Couples in the Three-phase Current About Smelting Furnace Making MgO

LIU Gang, LIU Yong

(High Degree Professional Technical School of An shan University of Science and Technology, Anshan 114044, China)

Abstract: After analysis of couples in the three-phase current about smelting furnace making MgO, two factors had been analyzed affecting the coupling coefficient. Basing on the analyzing the data tested, the coupling transfer function is given. The significance is to guide designing and studying the smelting furnace.

Key words: electrical smelting furnace; three-phase current; couples relation

1 前 言

MgO 晶体是一种用途广泛的高级耐火材料, 它的熔点高达 2 800 。由 MgO 晶体制成的高级耐火材料, 能耐 2 000 的高温^[1]。MgO 晶体的生产主要采用“电熔法(简称电熔镁)”。电熔镁炉已被广泛用于电熔镁砂的生产^[2]。

电熔镁炉电极的自动控制方式是引入电极电流(或电弧阻抗、电弧功率)作为反馈量, 进行闭环控制。虽然该方法已被广泛采用^[3~6], 但系统的传递函数往往是以三相独立为前提的。事实上, 电熔镁炉的三相电流之间存在强烈的耦合关系。本文对三相电极电流之间存在的耦合关系进行了分析, 给出了考虑相间电流的耦合关系时的传递函数。为优化设计控制器提供了理论依据。

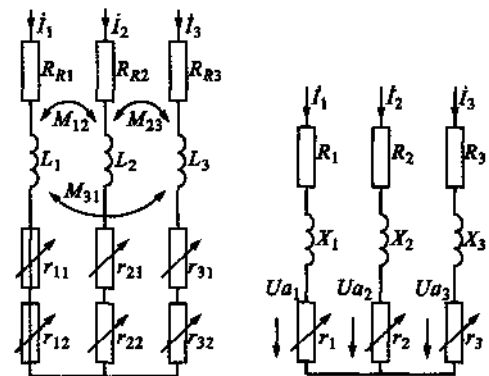
2 考虑相间互感的电熔镁炉三相间的耦合关系

2.1 电熔镁炉的电气等值电路^[7]

电熔镁炉一般以高压(6 ~ 10 kV)配电, 经电炉变

压器降压到适合于发生电弧的二次电压(~ 145 V), 再经过短网送入炉内。电熔镁炉的等效电路见图 1。

图 1 中: $R_{R1} \sim R_{R3}$ 为三相线路的等值电阻; $L_1 \sim L_3$ 为三相线路的等值电感; $r_{11} \sim r_{31}$ 为三相电弧等效电阻; $r_{12} \sim r_{32}$ 为三相熔池的等效电阻; M_{12}, M_{23}, M_{31} 为三相线路间的互感; $R_1 \sim R_3$ 为线路的等值电阻; $X_1 \sim X_3$ 为线路的等值感抗; $r_1 \sim r_3$ 为熔池和电弧的等值电阻。



(a) 三相不平衡等值电路 (b) 三相解耦等值电路

图 1 三相等值电路

由图 1 a 得

收稿日期: 2004-03-08; 修回日期: 2004-04-27

作者简介: 刘 刚(1964-), 男, 工程硕士, 副教授, 主要从事自动化方面的教学和科研工作;

刘 勇(1960-), 男, 工学学士, 副教授, 主要从事自动化方面的教学和科研工作。

示出比 SVC 装置补偿的优越性, 有源滤波器也将显示出比 LC 无源滤波器的优越性, 这是谐波治理与无功综合补偿的方向, 必将有力地推动电网电能质量技术的进步。

参考文献:

[1] 翁利民. 炼钢电弧炉对电网的干扰及其抑制方法 [A]. 电能质量国际研讨会论文集 [C]. 2002.

[2] 王海潜. 超高功率电弧炉冲击负荷引起电网电压波动值和 SVC 补偿容量计算方法的分析 [J]. 江苏电机工程, 1993, (3): 10.

[3] 同向前. 电弧炉的电压闪变(一) [J]. 工业加热, 1996, (2): 40-43.

[4] 翁利民. 超高功率炼钢电弧炉的电压闪变与抑制 [J]. 冶金动力, 2002, (1): 8.