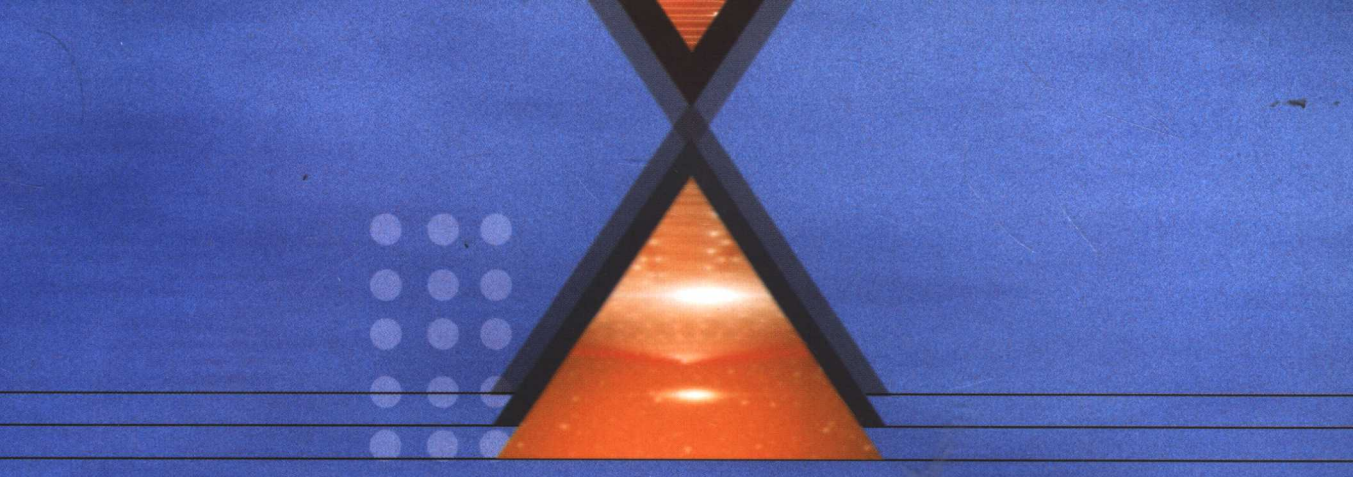




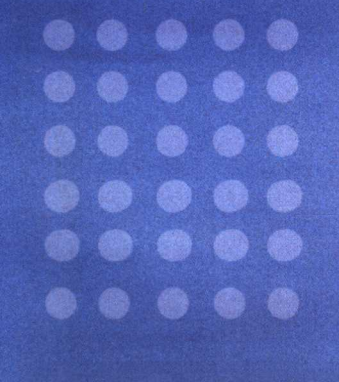
全国工矿企业电力安全与节能技术 优秀论文集

主 编 张瀚予
副主编 李 旭



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



全国工矿企业电力安全与节能技术 优秀论文集

主 编 张瀚予

副主编 李 旭

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

全国工矿企业电力安全与节能技术优秀论文集 / 张瀚予主编.
—北京:北京理工大学出版社,2006.1
ISBN 7-5640-0368-5

I.全... II.张... III.厂矿企业-工业技术-文集 IV.TM727.3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 136993 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefeditor@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 10

字 数 / 180 千字

版 次 / 2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1~1 000 册

定 价 / 68.00 元

责任校对 / 郑兴玉

责任印制 / 刘京凤

图书出现印装质量问题,本社负责调换

编 委 会

主 编:张瀚予

副主编:李 旭

编 委:许 颖 中国电力科学研究院原副院长,过电压保护专家,教授级高工
孟昭利 清华大学核能与新能源研究院教授,节能专家
王明俊 中国电力科学研究院原副总工程师,教授级高工,自动化专家
张节容 清华大学电机工程与应用电子系资深教授,开关专家
胡兆光 国家电力公司动力经济研究所教授,高级工程师,节能专家
马旺伟 济南钢铁股份有限公司总经理,高级工程师,炼钢专家

前 言

本论文集汇编了 18 个企业 39 位科技人员撰写的 21 篇论文。这些论文凸显了中共中央十六届五中全会要求的“着力自主创新”的精神。企业拥有自主知识产权的技术,才能在市场竞争中立于不败之地。余之经验,要做到自主创新,首先要学习并融会贯通国内外这方面的技术,吃透本企业这方面存在的问题,理论联系实际,不断实践,勇于创新。

余阅读这些论文,获益匪浅。例如,采用大型基础预制的施工方法,缩短检修工期,提高工效。很多论文中介绍了现有设备引入信息技术进行改造,提高工效,缩短与世界水平的差距;调整企业产业结构,转变企业经济增长方式的支撑点;应用变频调速技术节能提高工效,等等,不一一列举。

前人经验证明,文章总是难免有误。汇编的目的是交流经验、推动科技进步。

许 颖

目 录

避免雷击事故对供电线路和设备的影响	王学德(1)
大型轧钢电动机模糊控制	高忠升 孙彦伟 张兆春(8)
临钢电缆综合在线监测技术的研究与应用	
..... 秦 杰 常国庆 王天邦 杨永进 李志远(16)	
简析影响轧钢交流电机气隙的因素及对策	张友山(22)
十立方电铲 600 KW 发电机大修工艺	贾 奇(27)
立足人本,和谐管理,固安全之基,求最大效益.....	侯志勇(33)
电站锅炉喷淋段——旋流板塔脱硫除尘一体化装置改造应用研究	
..... 张广新 孙天增 王清臣(39)	
高硬度高碱性工业循环冷却水水质稳定剂的研究与应用	陈茂波 裴友民 王清臣(49)
实行设备点定巡检制度 推行设备“三主人”管理模式	蔡振国(59)
耗能型高压异步电动机节能技术改造分析	冯卓利 马春福 张智元(63)
国产高压变频器在锅炉引风机上的应用	宋 晖(68)
基础预制在石化生产装置检修中的应用	赵金民 任 敏(74)
渤西油气处理厂蒸汽锅炉燃烧器自动控制回路方案的技术改进	张映斌 杨义喜(78)
TranSyS 变电站综合自动化系统的实际应用	张景久(82)
油浸变压器常见异常的分析判断及处理	付连昆(89)
电力变压器的节能运行及应用	王向勇(95)
国产高压变频器在 300MW 汽轮发电机组凝泵上的应用	倪 洲(100)
添加氧化物制备大晶粒二氧化铈芯块的研究	颜学明 陈晓香 王友良(107)
煤炭企业信息化建设探讨	李馥财 李庆军 张胜存(123)
开发水煤浆产业是深化煤炭企业产业结构调整的发展战略	马绍民 蔡恒奎(137)
矿井供电无功补偿和谐波抑制应用 TSC 装置	刘长生(145)

避免雷击事故对供电线路和设备的影响

王学德

(莱芜钢铁集团有限公司动力部)



王学德

〔摘要〕 本文通过对近几年莱钢供电系统遭遇雷击影响的分析,根据供电系统雷击防护原理,结合莱钢现存电力系统实际状况,提出了改造治理方案,收到了较好的改造效果。

〔关键词〕 雷击 供电线路、设备 影响

莱芜钢铁集团公司坐落于莱芜市钢城区,周围群山环绕,属于山区丘陵地带;地质结构复杂,分布着许多金属矿层,属多雷区,雷暴日平均31.2小时/年,是山东省雷暴日较高地区之一。加之近年来大气气候变暖,温室效应致使降雨季节延长,雷击现象时有发生,成为影响安全生产的重要因素之一,严重制约了钢铁冶炼的生产,阻碍了工作效率和经济效益的提高。雷电灾害已成为影响莱钢整体发展的一大公害。莱钢有二级生产单位20多个,分布于群山之间,供电线路多以架空线路为主;拥有110 kV、35 kV、6 kV 高压输配电线路190多千米。在2002年统计的27次停电事故中,雷击事故有9次,占事故总数的33.3%。停电造成的停水、停工、停产给莱钢生产、建设带来了较大损失,给莱钢职工生活造成了不便。所以,高压线路防雷改造是十分必要的。经过调查、分析、研讨、论证,根据对每条供电线路的实地考察的情况,我们制定出一套适合实地情况的防雷方案,来避免雷电现象对安全生产造成的损失。

一、莱钢供电系统雷击实例分析

2002年7月5日,6 kV 服务线、小轧线遭雷击跳闸停电。

2002年7月21日,6 kV 南莱线一陈支线金矿进线杆遭雷击击坏瓷瓶、击断导线、跳闸停电。

2002年8月1日,带钢Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ线遭雷击相继跳闸。带钢Ⅰ线5#杆遭雷击断线、3只支柱瓷瓶被击炸裂。带钢Ⅱ线4#杆、5#杆4只支柱瓷瓶被击炸裂。带钢Ⅲ线3#杆绝缘悬垂被击毁4片、1只支柱瓷瓶被击炸裂。事故的发生造成带钢厂全厂停电停产。

同日,烧焦Ⅰ线4#杆4只支柱瓷瓶被击炸裂、两相导线断线。焦化厂部分停电停产,损失巨大。

2002年8月22日钼Ⅰ线11#杆遭雷击造成瓷瓶损坏;钼Ⅱ线11#杆瓷瓶击毁、导线击断,使钼庄水泵房停电停水,损失较重。

自 2001 年以来,供水车间曾经遭受过雷害的有:自来水厂门卫、加药间遭受直击雷共计 3 次,付家桥水源地——铁 1 # 井遭受感应雷 2 次,丈八丘水源地遭受直击雷 1 次,清一级线路遭受感应雷 1 次,其他雷害 3 次。

从上述雷击现象看,100% 为雷击杆顶,反击 6 kV 线路。造成击毁瓷瓶、反击断线,直击雷作用显著。

历年线路雷击事故的经验告诉我们,造成线路雷击事故的主要原因是直击雷,雷直击于线路的情况主要有三种:雷击杆顶、雷击档距中央和绕击,对于无避雷线的 6kV 高压线路雷击事故主要是雷击杆顶造成的,山区击杆率约为 2/3。从历年统计数据看,我公司线路雷击事故的 80% 是由雷击杆顶形成的。根据线路主要落雷区和雷击部位,确定了重点落雷区增设避雷器、加装避雷针、增强绝缘、改善接地的避雷防雷方案。

二、问题的提出

针对以上事故现象,根据安全生产形势的要求,本着既要处理已发生的类似雷击事故,又要对可能出现的雷击事故充分预想的原则,应重点解决以下问题:

- ① 高压架空线路的避雷防雷;
- ② 变电所高压设备的避雷防雷;
- ③ 变电所通讯设备的避雷防雷;
- ④ 变电所微机设备的避雷防雷。

莱钢电力系统变电所高压设备及通讯设备的避雷防雷措施,在设计、安装阶段已较为完善,保护措施较为完整,因此,本文主要是通过对高压架空线路和微机设备的避雷防雷措施的选择与交流,进一步阐述避免雷击事故对供电线路设备的影响,以及给电网安全运行带来的巨大经济效益。

三、供电系统防雷理论依据

1. 线路遭受雷击的基本机理

在雷击线路杆顶时,雷电通道中的电荷与电杆上的异性感应电荷迅速中和形成雷电流,线路绝缘水平若低于该雷电过电压,则引起线路绝缘发生冲击闪络,6 kV 线路单相闪络不会造成跳闸,只有当两相或三相导线发生反击后才造成相间闪络而跳闸;且当电杆接地不良时,会发生瞬间雷暴放电造成击坏瓷瓶等设备损坏。雷击杆顶时,雷电流经电杆流入大地,电杆接地电阻呈暂态电阻特性,一般用冲击接地电阻来表征。

雷击电杆时杆顶电位迅速提高,其电位值为

$$U_t = iR_d + L \cdot di/dt$$

式中 i ——雷电流;

R_d ——冲击接地电阻;

$L \cdot di/dt$ ——暂态分量。

当杆顶电位 U_t 与导线上的感应电位 U_1 的差值超过绝缘子串 50% 的放电电压时, 将发生由杆顶至导线的闪络。即 $U_t - U_1 > U_{50}$, 如果考虑线路工频电压幅值 U_m 的影响, 则为 $U_t - U_1 + U_m > U_{50}$ 。因此, 线路的耐雷水平与三个重要因素有关, 即线路绝缘子的 50% 放电电压、雷电流强度和电杆的冲击接地电阻。一般来说, 线路的 50% 放电电压是一定的, 雷电流强度与地理位置和大气条件相关, 不采取避雷措施时, 提高输电线路耐雷水平往往是采用降低电杆的接地电阻。在山区, 6 kV 线路电杆的接地电阻往往较高, 是输电线路屡遭雷击的主要原因之一。

2. 避雷措施介绍

(1) 措施一: 架设避雷线。

架设避雷线是世界上公认的架空线路的最基本防雷保护措施。其防护情况如下:

① 拦截雷直击相导线, 由于避雷线对线路的保护作用, 绕击率降低。单避雷线保护角不大于 30° , 双避雷线不大于 20° 。

② 雷击杆塔时, 避雷线起分流作用。流经被击杆塔和接地体的雷电流只是总雷电的一部分, 避雷线根数越多, 分流越大, 效果越好。

③ 避雷线与导线间的电磁耦合作用, 提高耐雷水平。

(2) 措施二: 装设避雷针。

避雷针是最早的接闪器, 也是目前世界上公认的最成熟的防直击雷装置。避雷带、避雷网、避雷线是避雷针的变形, 其接闪原理是一致的。对避雷针的接闪原理的认识是有一个发展过程的, 现在的滚球法理论比较全面地解释了接闪器吸引雷电的各种现象, 被国内外标准所采纳。滚球法理论认为:

① 球与接闪器和地面相切绕接闪器滚动一周所形成的阴影区域即为接闪器的保护范围, 保护半径根据不同的防雷类别分别选为 30 m、45 m、60 m。

② 在保护范围内并不是没有雷击, 只是雷击能量较小, 滚球半径越小, 进入保护范围的雷击能量也越小, 也就是说接闪器的防雷效果越好。

③ 接闪器并非越高越好, 超过 60 m 的接闪器在技术上是没有什么意义的。

(3) 措施三: 增设绝缘子片数。

提高绝缘部件的绝缘等级。

(4) 措施四: 降低接地电阻。

架空线路本身的防雷接地。

(5) 措施五: 增设避雷器。

为保护雷电波侵入变电站以及针对 6 kV 输电线路无架空地线山区段的防雷问题, 采用在雷击点挂装有机复合绝缘交流无间隙金属氧化物

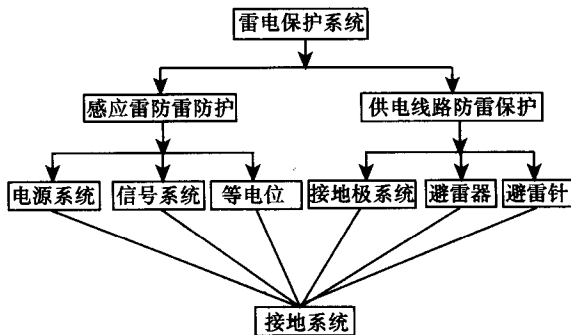
避雷器的防雷新措施。

四、方案选择及设计依据

根据分析,为尽可能有效地防止各种雷击造成高压线路停电,有必要采取综合的防雷措施,即:在确定线路防雷方式时,全面考虑线路的重要性、系统运行方式、线路经过的地区、雷电活动的强弱、地形地貌特点以及土壤电阻率的高低等条件,进行合理性及经济性比较,因地制宜,采取某一项或将几项措施综合实施,重点部位、重点线路层层设防,以取得最佳防雷实施效果。

避雷防雷的措施主要从三方面确定:第一,提高线路绝缘水平;第二,引流泄流;第三,降低接地电阻。提高绝缘水平主要是增加绝缘子数量,加大绝缘爬距以提高线路绝缘的放电电压。

雷电保护整体系统设计结构如下:



IEC1024,1312,61643,61644

引流泄流的措施如下:

1. 避雷针的选择(单针)

在地面上的保护半径为

$$R = 1.5hP \quad (1-1)$$

式中 R ——保护半径,m;

h ——避雷针高度,m;

P ——修正系数。 $h \leq 30$ m时, $P = 1$; 30 m $< h \leq 120$ m时, $P = 5.5/\sqrt{h}$ 。

保护高度 h_x 水平面上的保护半径为

$$R_x = (h - h_x)P = h_aP \quad (h_x \geq 0.5h) \quad (1-2)$$

$$R_x = (1.5h - 2h_x)P \quad (h_x < 0.5h) \quad (1-3)$$

式中 R_x ——保护高度 h_x 水平面上的保护半径,m;

h_x ——保护高度,m;

h_a ——避雷针有效高度,m。

2. 避雷线的选择

两根等高平行避雷线的保护范围为

外侧的保护范围为

$$R_x = 0.47(h - h_x)P \quad (h_x \geq 0.5h) \quad (1-4)$$

$$R_x = (h - 1.53h_x)P \quad (h_x < 0.5h) \quad (1-5)$$

式中 R_x ——保护高度 h_x 水平面上的保护半径, m。

两避雷线间的保护范围为

$$h_0 = h - D/4P \quad (1-6)$$

式中 h_0 ——两避雷线间的保护范围最低点的高度, m;

D ——两避雷线间距离, m;

h ——避雷线的高度, m。

3. 6 kV 避雷器的选择

选择 6 kV 有机复合绝缘交流无间隙金属氧化物避雷器, 型号为 HYSWS-10/30, 其主要技术性能如下:

(1) 系统额定电压 6 kV, 避雷器额定电压 10 kV, 持续运行电压 8 kV, 8/20 残压 ≤ 30 kV, 操作冲击残压 ≤ 25.8 kV, 直流 1 mA 参考电压 ≥ 15 kV, 2 ms 方波通流容量 100 A。

(2) 使用条件: 最大风速不大于 35 m/s, 环境温度 ≤ 40 °C, 长期施加在避雷器上的工频电压不大于避雷器的持续运行电压。

4. 降低接地电阻

有避雷线的架空线路的工频接地电阻见表 1。

表 1 有避雷线的架空线路的工频接地电阻

土壤电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	接地电阻/ Ω	土壤电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	接地电阻/ Ω
$\rho \leq 100$	10	$1\,000 < \rho \leq 2\,000$	25
$100 < \rho \leq 500$	15	$\rho > 2\,000$	30
$500 < \rho \leq 1\,000$	20		

(1) 有避雷线的架空线路的防雷接地。35 kV 及以下线路, 对设有避雷线的架空线路, 在干燥季节, 每基杆不连避雷器的工频接地电阻不宜超过表 1 中所列数值。如土壤电阻率很高, 接地电阻降到 30 Ω 有困难时, 可采用总长度不超过 500 m 的 6~8 根放射形接地极或连续延长接地极, 此时接地电阻不受限制。

(2) 无避雷线的架空线路的防雷接地。小接地短路电流系统中, 35 kV 及以上无避雷线线路中的钢筋混凝土杆和铁塔的铁横担均宜接地。在一般地区, 接地电阻没有要求, 但在多雷区不宜超过 30 Ω 。应充分利用钢筋混凝土杆作自然接地极, 在土壤电阻率不超过 100 $\Omega \cdot m$ 或运行有经验地区可不另设接地装置。长线路中的绝缘弱点, 宜采用避雷器, 其接地电阻不超过上表中所列的数值。

(3) 线路交叉部分的防雷接地。6 kV 及以上同级电压相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时, 不论有无避雷线, 在交叉档前后线路

各两基的钢筋混凝土杆或铁塔均应接地。如自然接地电阻不超过表 1 所列数值的两倍时,可不另设接地极;否则应增设接地极,专设接地极与自然接地极的综合电阻不超过表 1 中所列数值的两倍。

(4) 接地引下线。钢筋混凝土杆铁横担的避雷线支架,导线横担与绝缘子或瓷横担固定部分之间,宜有可靠的电气连接并与引下线相连。电杆内非预应力钢筋,如已用绑扎或焊接连成电气通路,该钢筋可兼作接地引下线;在小接地短路电流系统中,如无可靠措施,预应力钢筋不宜兼作接地引下线。利用钢筋作为引下线的钢筋混凝土杆,其钢筋与接地螺母、铁横担间应有可靠的电气连接。外敷的接地引下线,可采用镀锌钢绞线,其截面不小于 25 mm^2 ,从接地极引出的接地线,截面不小于 50 mm^2 并应热镀锌。

(5) 增设绝缘子片数以提高绝缘部件的绝缘等级。

(6) 变电站防雷。通过改善变电站接地网,延伸接地线、改善土壤和加降阻剂,降低接地电阻以提高变电站防雷水平。

五、方案实施

1. 线路防雷

(1) 在带钢 I、II、III 线的 2# ~ 6# 杆 4 档间架设两条避雷线,架设避雷线的杆塔顶端加装简易避雷针。

(2) 带钢 I、II、III 线 1#、2#、6#、8# 杆各装设合格避雷器;避雷器接地与避雷线相连,接地电阻要尽量小于 10Ω ,同时在耐张杆增加绝缘子片数。

(3) 莱钢技校一带增设避雷针一只,保护途经此地的二铁 I、II 线,矿焊线,南岭沿股 I、II 线 3# ~ 6# 杆设独立避雷针 3 只,保护股 I 线、II 线、6 kV 联络线、金鼎线。

(4) 在服务线、小轧线、南莱线落雷点设简易避雷针 9 只。

(5) 烧焦 I、II 线 4#、5# 杆设简易避雷针 4 只。

(6) 钥庄 I、II 线 10#、11#、12# 杆各设简易避雷针 6 只。

(7) 分别在一、二降至山下线等 6 kV 线路上、雷电高发地段、增设杆上避雷针共 8 处,避免雷电对电力线路的侵害。

(8) 变电所等建筑物设避雷针 8 只。

2. 微机保护设备防雷

计算机机房配电箱前端加装 SP1531 避雷器做二级防雷防护。

机房不间断工作电源前端加装 SP1511 避雷器保护 UPS 及后端设备(交换机、服务器、打印机等)。

计算机网络布线已考虑到防雷的要求,尽可能地避免与电力线平行和远离建筑物外墙体,减少感应雷的侵害。

与电视电话会议系统一起做了独立与建筑物的接地系统,以防止雷击建筑物的地电位反击。

计算机供电系统所有配备计算机的房间电源插座进行三级防护,加装 MPS025 - 280 避雷器。

拨号联网计算机接口处的雷电防护,入室电话线与调制解调器插口间通过接入 RJ11 - 180A 避雷器。

电视电话会议系统电视闭路线入室端加装 RS232 - 09A 避雷器。

电话进线加装 RJ11 - 180A 避雷器。

在办公楼采用三级保护,总配电箱安装 SP6531 防雷装置 1 组,楼层配电箱安装 SP4031 防雷装置 10 组,主机房电源防护装置 1 只。

六、实施效果

经过 2003 年一年的实践检验,莱钢电力系统防雷设施取得了明显的效果,收到了较好的经济效益和社会效益,全年莱钢区域夏季雷暴日比 2002 年增加 10%,但仅有两次造成供电线路跳闸停电,线路遭遇雷击损害的频次降低 77%,减少停电损失约 500 余万元,确保了莱钢生产经营建设的用电需求。

作者简介

王学德,男,1961 年 7 月出生,山东莱芜人,1985 年 5 月加入中国共产党,1982 年毕业于山东工业大学,研究生学历。历任莱钢动力部供电车间副主任、主任,制氧车间党支部书记,机动技术科科长;1999 年 11 月为动力部党委副书记、纪委书记、工会主席、高级政工师;2003 年 6 月为动力部部长、党委副书记、天元公司董事长、经理、高级工程师。善于系统思考,勇于改革创新,优化整合资源,创建学习型团队,促进了企业三个文明建设健康协调发展。先后荣获山东省冶金系统设备管理先进个人、民主管理先进个人、优秀工会工作者,莱钢十杰青年、20 世纪 80 年代优秀毕业生、优秀党员标兵、劳模等荣誉称号,先进事迹被山东省委组织部编制成《山东党员》电教片。

大型轧钢电动机模糊控制

Large Steel Rolling Electrical Machinery Intelligent Control

高忠升 孙彦伟 张兆春

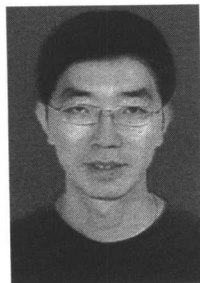
(济南钢铁集团股份公司)

[摘要] 本文将模糊-神经网络控制以及自适应控制引入大型同步电机交-直-交变频调速矢量控制系统中。用模糊控制的方法来调整 BP 算法中的学习步长和动量项因子,仿真实验表明,各项指标均优于传统 PI 控制方式。

[关键词] 神经网络 模糊控制 模糊神经网络

[ABSTRACT] This paper applied fuzzy-nerve net control and self-adapt-control in the vector control system in converter-inverter variable frequency speed-regulated drive system of large power synchronous motor. Fuzzy control is used to modify the learning step size and inertia item of BP algorithm. The results of simulation verified that all performance figures of these intelligent control are better than those of traditional PI control.

[Key words] Intelligent Control Fuzzy Control Fuzzy-Neural Networks



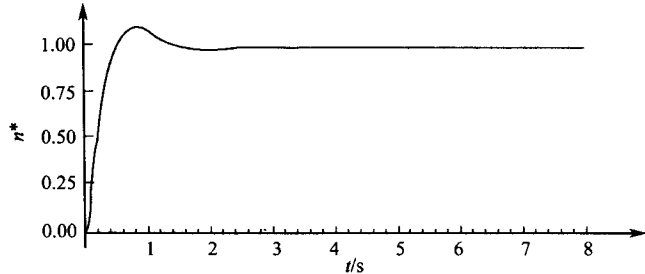
高忠升

一、引言

近些年来,国际上掀起了模糊理论和神经网络的研究热潮,并已在许多领域取得巨大进展。智能控制的研究虽已有多年历史,但在大型同步电机交-直-交变频传动系统的应用却不多,还处于不断发展和完善过程之中。模糊逻辑比较适合表达模糊或定性的知识,其推理方式比较类似于人的思维模式,但一般来说它缺乏自学习和自适应能力。神经网络具有并行计算、分布式信息存储、容错能力强以及具备自适应学习功能等一系列优点,但神经网络不适合表达基于规则的知识,因此对神经网络进行训练时,由于不能很好地利用已有的经验知识,常常只能将初始权值取为零或随机数,从而增加了网络的训练时间或者陷入非要求的局部极值,这是神经网络的一个不足。基于以上的原因,本文将两者适当地结合起来,吸取两者的长处,组成模糊神经网络系统,并将之应用于济钢中厚板厂粗轧机主传动交-直-交变频调速系统中,以期对主传动电机变频调速系统以及对其他项目的改造提供有益的帮助。

二、额定负载下 PI 调节转速曲线

由文献[1]中同步电动机的多变量动态数学模型可得额定负载下转速曲线,如图 1 所示。图中, n^* 为转速的标么值。



最大超调量:10.89%;上升时间:0.42 s;调节时间:1.24 s

图 1 额定负载下转速曲线

三、网络结构的确定

由于神经网络的学习的样本来自 PI 速度调节器,神经网络的功能就是对速度调节器的输入、输出的逼近,即函数估计,所以,网络结构选用 BP 网络;根据在达到要求的条件下,选择最少隐层的原则,故选择一个隐层,这样,网络结构就分为三层(输入层、隐含层、输出层);其中,输入层有三个神经元,分别对应速度调节器的本次输出、误差及误差变化率;隐含层由 25 个神经元组成(根据精度要求而定,太少达不到精度要求,太多精度已无明显提高);输出层有一个神经元组成,对应速度调节器的下次输出。BP 网络的结构如图 2 所示。

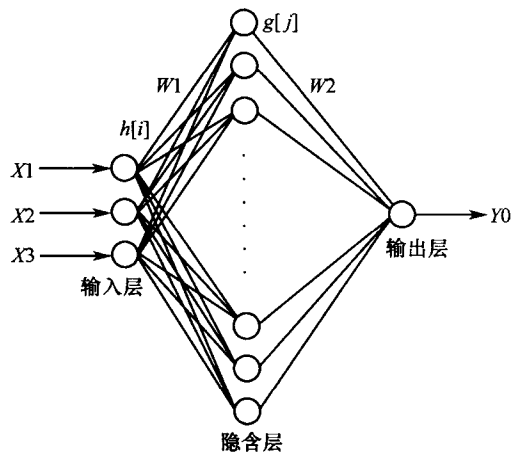


图 2 BP 网络结构图

四、修正参数的确定

BP 算法中,控制目标是总的误差平方和 E ,即各样本的理想输出与实际输出之差的平方和。从 BP 网络的误差曲面的分析可知,在误差曲面上存在许多平坦区域和一些陡峭的谷区,前者是误差随权值的变化改变量很小的区域,而后者则是误差随权值的改变变化剧烈的区域。因此,在平坦区,应加大学习率 η ,使得误差尽快脱离平坦区,而在谷区,往往谷底就是误差极小点,但如果误差变化过于激烈,就很可能使得误差从一个谷壁跳到另一个谷壁,在谷点周围振荡,这时应减小 η 以加快收敛。这就需要判断误差曲面的形状,以此来调节受控量。由解析几何原理可知,一个函数的一阶导数和二阶导数可以判断该误差的变化趋势,因此,选择误差函数的一阶导数 CE 和二阶导数 CCE 作为模糊控制器的输入。

由前面的论述可知,BP 算法中收敛速度主要受学习步长 η 的影响。如果算法中加入了动量因子 α ,则 α 的改变也将影响算法的收敛速度。因此,在 BP 网络的模糊控制器中,选取 η 和 α 两个参数作为受控量,而模糊控制器输出的受控量则为 $\Delta\eta$ 和 $\Delta\alpha$ 。

五、系统参数的离散化和模糊化

误差函数 E 的一阶导数 CE 和二阶导数 CCE 可以用两次迭代的误差改变量来近似,即

$$CE(n) = E(n) - E(n-1) \quad (1-1)$$

$$CCE(n) = CE(n) - CE(n-1) \quad (1-2)$$

然后根据计算得出 $CE(n)$ 和 $CCE(n)$ 的值来确定学习步长 η 和动量因子 α 的变化量 $\Delta\eta$ 和 $\Delta\alpha$ 。

CE 和 CCE 的语言变量(模糊子集)分为 NB(负大)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PB(正大)五个模糊量,并将 CE 和 CCE 的值离散化,分为 7 档,每一档对应一个模糊集,然后进行模糊化处理。由于 CE 和 CCE 的变化范围一般在 $[-0.2, 0.2]$ 之间,所以可通过下式进行变换

$$\begin{aligned} Y &= \text{Int}\left[\frac{2n}{b-a}\left(x - \frac{a+b}{2}\right)\right] \\ &= \text{Int}\left[\frac{2 \times 3}{0.2 - (-0.2)}\left(x - \frac{-0.2 + 0.2}{2}\right)\right] \\ &= \text{Int}(15x) \end{aligned} \quad (1-3)$$

将 CE 和 CCE 的值转化为 $[-3, 3]$ 之间的整数,然后对 CE 和 CCE 赋值。 CE 和 CCE 的赋值表如表 1 所示, $\Delta\eta$ 和 $\Delta\alpha$ 的赋值表如表 2 所示。

表 1 变量 CE 和 CCE 的赋值表

级数 变量	-3	-2	-1	0	1	2	3
PB						0.4	1.0
PS				0.6	1.0	0.6	
ZE			0.7	1.0	0.7		
NS		0.6	1.0	0.6			
NB	1.0	0.4					

表 2 变量 $\Delta\eta$ 和 $\Delta\alpha$ 的赋值表

级数 变量	-3	-2	-1	0	1	2	3
PB						0.4	1.0
PS				0.6	1.0	0.6	
ZE			0.7	1.0	0.7		
NS		0.6	1.0	0.6			
NB	1.0	0.4					

六、控制规则的确定

隶属度函数的确定事实上是对经验的总结。因此,确定隶属度函数的过程就是将知识融入模糊控制器的过程。表 3 和表 4 给出了 $\Delta\eta$ 和 $\Delta\alpha$ 的控制规则。

(1) 如果 CE 为绝对值小的负值,则学习步长 η 增大。因为此时 CE 的状态说明正沿着误差减小的方向变化,每次的改变量不大,因此可以增大 η 以加速误差下降。

(2) 如果 CE 的值很大,则应减小学习步长 η 。这时误差 E 变化剧烈,易发生振荡,应减小 η 让误差逐渐向谷底靠近。

(3) 如果 CE 和 CCE 都很小,那么 η 和 α 的值都要增大。

(4) 当误差变化很小时,使 α 增大以提高对前次迭代的继承性;当误差变化剧烈时,则使 α 减小以减小前次迭代的影响而使此次权值调整量更大程度依赖于 η 。