

咸庆信 编著



工业电器的 节能设计 与应用实例解析



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

工业电器的节能设计与 应用实例解析

咸庆信 编著



机械工业出版社

本书侧重于电力拖动领域的节电控制技术和运用电子技术进行节能改造的技术方法。对作为“耗电大户”的电力拖动系统,采取变频、降压等节电运行措施,使其更为高效地运行,通过节能挖潜(在现有配置基础上进行节能技术改造或改变其运行模式)降低电能损耗,达到节能(节电)目的,是本书所涉及的重点所在。与其他同类书相比,生产实践是作者的写作源泉,本书直接指向实施节能(节电)控制的具体的电子电路,分析其电路原理、提供设计参考,给出必要的故障检修指导,将节能控制设备(或设施、装置)落实于电路“细节”,变成读者看得见的“具象”电路。这也是作者写作风格的一贯体现。

针对广大的相关院校师生,在经历连篇累牍的理论推演之后,能看到这类仍在实际运行当中的,极具质感和亲切感的“电路实物”,其重要意义是不言而喻的。

本书作为工具书和参考书,适合于广大电工人群,从事电气自动化工程、电力电子、电气传动专业的技术工程人员和设计人员,也可作为相关专业院校师生的电子技术参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

工业电器的节能设计与应用实例解析/戚庆信编著. —北京:机械工业出版社, 2013.6

ISBN 978-7-111-42056-9

I. ①工… II. ①戚… III. ①电器-节能设计 IV. ①TM502

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第068503号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:朱林 责任编辑:朱林

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:赵颖喆 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·357千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-42056-9

定价:46.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

节能技术是一个外延极为宽泛的课题，涵盖了工业控制乃至居家生活的各个方面：从太阳能发电、绿色（荧光灯）照明等能源战略，到电气传动领域的节能运行、工业自动控制的节能改造等。如果从更广义的角度来说，科学技术的发展、各种工业控制设施的技术完善与进步，其中都包含着节能改造的内容。

各种设施、设备的小型化、智能化、高效化的发展，是节约材料消耗、节省人力资源、提高工效、节能（节电）的结果，所以说技术的进步，主旋律是促进了产品的智能化和相关控制性能，而节能改造作为不可或缺的副旋律，往往贯穿其中，如影随形。变频调速器产品的出现，就是一个最为经典的例子。在完成调速控制、提升自动控制能力、提高产品质量的同时，也带来了显著的节电效益。

本书侧重于电力拖动领域的节电控制技术和运用电子技术进行节能改造的技术方法。对作为“耗电大户”的电力拖动系统，采取变频、降压等节电运行措施，使其更为高效地运行，通过节能挖潜（在现有基本配置上改变其运行模式）降低电能损耗，达到节能（节电）目的，是本书所涉及的重点所在。与其他同类书相比，生产实践是作者的写作源泉，本书直接指向实施节能（节电）控制的具体的电子电路，分析其电路原理、提供设计参考，给出必要的故障检修指导，将节能控制设备（或设施、装置）落实于电路“细节”，变成读者看得见的“具象”电路。这也是作者写作风格的一贯体现。

书中相关电子电路的实例，多为作者在生产实践中所测绘的，并亲身经历了该类产品的生产、安装调试与维修过程，部分产品作者也参与了产品的电路设计。书中涉及的产品，社会拥有量巨大，正在工业控制领域发挥着节能与控制的双重作用，是工业电器领域中的节能电器。

针对广大的相关院校师生，在经历连篇累牍的理论推演之后，能看到仍在运行当中的，极具质感和亲切感的“电路实物”，其重要意义是不言而喻的。

本书作为工具书和参考书，适合于广大电工人群，从事电气自动化工程、电力电子、电气传动专业的技术工程人员和设计人员，也可作为相关专业院校师生的电子技术参考教材。

一本书的出版，不是一个人的事情。在此向促成本书问世的我的朋友们、我的家人、机械工业出版社的编辑，表示由衷的感谢！

测绘电路和在测绘电路基础上的电路解析，有着难以避免的纰漏，再加上限于作者的学识水平、时间和精力，书中可能存在疏忽和谬误之处，恳请广大读者及时指正，作者深表感谢！

我的电子邮箱：lyfxian@163.com。

咸庆信

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 电力拖动系统实现节电运行的方法	1
1.3 技术进步带来的节能效益和节能改造	4
1.4 本书读图及其他阅读事项	4
第 2 章 无功功率动态补偿装置	8
2.1 电容无功补偿的原理	8
2.2 无功补偿的方式	10
2.3 电容器组的自动投切控制	13
2.4 无功补偿的系统设计参考	14
2.4.1 无功补偿容量的确定	14
2.4.2 电容投切主电路的形式	17
2.4.3 控制器的电路构成和工作原理	18
2.5 简单实用的无功补偿控制器：无功补偿器电路实例一	20
2.5.1 无功补偿控制器用到的 IC 器件	20
2.5.2 无功补偿控制器整机电路	26
2.5.3 无功补偿控制器的调试、运行情况和故障排除	28
2.6 JKL5CF 型智能无功功率补偿控制器：无功补偿器电路实例二	28
2.6.1 12 支路电容无功功率补偿柜	28
2.6.2 JKL5CF 型无功功率自动补偿控制器的产品性能概述	30
2.6.3 JKL5CF 型无功功率自动补偿控制器的整机电路	32
2.6.4 JKL5CF 控制器（及电容补偿柜）的故障检修	37
第 3 章 星-三角节电智能控制装置	42
3.1 电动机星-三角减压起动装置	42
3.2 简易的星-三角减压节电运行装置	44
3.3 星-三角节电智能控制装置的设计要点及应用特点	46
3.4 GJBK-1 型电动机星-三角节能保护控制器	47
3.5 GJBK-2 型电动机星-三角节能保护控制器	56
第 4 章 电抗器智能调压节电装置	62
4.1 产品概述及节能原理	62
4.2 KGK-3 型电抗器智能调压节电装置的设计思路	62
4.2.1 设计“灵感”的来源之一	62
4.2.2 设计“灵感”的来源之二	63
4.3 KGK-3 型电抗器智能调压节能装置的构成和产品性能	64
4.4 KGK-3 型电抗器智能调压节能装置的控制电路	66
4.5 KGK-3 型电抗器智能调压节能控制器电路原理分析	68

4.6 KGK-3 型电抗器智能调压节能装置的故障检修	74
第5章 晶闸管调压节电装置	77
5.1 产品概述及节能原理	77
5.2 系统基本构成	78
5.3 控制电路设计要点	78
5.4 晶闸管调压节能装置的电子技术基础	81
5.5 DJK3 型电动机节电器整机电路原理分析与故障检修	93
5.6 KJK-1 型晶闸管节电控制装置	101
5.6.1 KJK-1 型晶闸管节电控制装置整机电路原理分析	101
5.6.2 KJK-1 型晶闸管节电控制装置的故障检修	107
第6章 变频节电装置	110
6.1 变频器应用原理概述	110
6.2 变频器的设计思路和设计要点	111
6.2.1 变频器的控制方式	111
6.2.2 变频器硬件电路的构成	112
6.3 变频器的基础性应用 (以中达 VFD-B 型 22kW 变频器为例)	118
6.4 风机水泵变频节能原理和应用实例	124
6.4.1 恒压供水变频一拖二系统设计思路	125
6.4.2 恒压供水变频一拖二系统的 (控制) 电路构成	127
6.4.3 系统的控制思路和注意要点	127
6.4.4 系统控制功能表图及程序电路	129
6.4.5 恒压供水变频一拖二的系统调试	134
6.5 中达 VFD-B 型 22kW 变频器的整机电路	135
6.5.1 中达 VFD-B 型 22kW 变频器的电路板实物	135
6.5.2 中达 VFD-B 型 22kW 变频器的整机电路原理解析和故障检修要点	137
6.6 VFD-B 型 22kW 变频器的故障检修实例	155
第7章 直流弧焊机的节能改造与技术进步	162
7.1 直流弧焊机的技术发展与节能改造	162
7.2 AX7-300 型旋转式直流弧焊机	164
7.3 ZXG 系列 (100-1000 型) 硅整流弧焊机	165
7.4 NBC-160F 型二氧化碳气体保护半自动焊机	167
7.5 ZS5-400 型晶闸管直流弧焊机	170
7.6 ZX7-315 型逆变焊机	176
7.7 WSW-160 型直流逆变氩弧焊机	188
第8章 小型的节能改造	195
8.1 温度控制的节能改造	195
8.1.1 温度控制方法简述	195
8.1.2 位式控制: XMT-102 型数显调节仪	197
8.1.3 线性控制: TA9-IRR 型智能温控表和晶闸管控温电路	200
8.2 自动液位/压力控制的节能改造	214
8.2.1 三线/两线式水位控制器	214
8.2.2 JYB-714 型液位晶体管继电器	215

8.2.3 小区供水管网压力控制器·····	216
8.3 交流接触器的无声节电运行器·····	218
8.3.1 交流接触器无声节电运行电路·····	218
8.3.2 DB5-2 型消声节电直流运行装置 ·····	219
8.4 电动机星-三角起动控制器·····	219
8.4.1 ST3PR 型星-三角起动控制器·····	219
8.4.2 XJQ-2 型星-三角起动器 ·····	221
8.5 电焊机空载节电器·····	223
8.5.1 电焊机空载自停节电控制·····	223
8.5.2 电焊机空载节电控制·····	224
参考文献 ·····	225

第1章 绪 论

1.1 概述

节能,或称节能技术,是一个外延极为宽泛的课题,涵盖了工业控制乃至居家生活的各个方面,从太阳能发电、绿色(荧光灯)照明等能源战略,到电气传动领域的节电运行等。如果从更广义的角度来说,各种科学技术的发展、各种设施的技术完善与进步,其中无不同步跃进着节能改造的步伐。

各种设施、设备的小型化、智能化、高效化的发展,是节约材料消耗、节省人力资源、提高工效、节能(节电)的结果,所以说技术的进步,主旋律是促进了产品的智能化和相关控制性能,而节能改造作为不可或缺的副旋律,往往贯穿其中,如影随形。变频调速器产品的出现,就是一个最为经典的例子。在完成调速控制、提升自动控制能力、提高产品质量的同时,也带来了显著的节电效益。

这样庞大而浩瀚的课题,仅用一本书来展现是无法企及的。就节能领域的不同,可大体分为电气领域和非电气领域,当然电气领域可以进一步细分为电力拖动系统、电力拖动系统以外的其他电气节能等,因而本书侧重于电力拖动领域的节电控制技术和相关运用电子技术进行节能改造的技术方法,第2~6章主要阐述采用相关技术措施,使电力拖动系统更为高效地运行,通过节能挖潜(在现有基本配置上改变其运行模式)降低电能损耗,达到节电目的的节能;第7、8两章阐述利用电子技术对相关工业控制进行节能改造。换言之,本书所涉及的节能内容主要为节电,并且都与电子控制技术相关。与其他同类书相比,生产实践是作者的写作源泉,本书直接指向实施节能(节电)控制的具体的电子电路,分析其电路原理、提供设计参考,必要时给出故障检修指导,将节能控制设备(或设施、装置)落实于电路“细节”,变成读者看得见的“具象”电路。这也贯穿了作者一贯的写作风格。

针对广大的相关院校师生,在经历连篇累牍的理论推演之后,能看到这仍处于运行当中的,极具质感和亲切感的“电路实物”,其重要意义是不言而喻的。

1.2 电力拖动系统实现节电运行的方法

凡是由电动机作原动机拖动生产机械运转能完成生产任务的系统,都称为电力拖动系统。电力拖动系统是机械设备的一部分,一般由4个部分组成:

- 1) 电源:电源是电动机和控制设备的能源,分为交流电源和直流电源。
- 2) 电动机:电动机是生产机械的原动机,其作用是将电能转换为机械能,电动机分交流电动机和直流电动机,前者应用较为广泛。
- 3) 控制设备:控制设备用来控制电动机的运转,由各种控制电动机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成。

4) 传动机构: 传动机构是在电动机与生产机械的工作机构之间传递动力的装置, 如减速箱、传动带和联轴器等。

已成型的配套电力拖动系统, 可能有以下原因导致电能的浪费:

1) 有些设施需重载起动, 轻载运行, 即存在所谓“大马拉小车”的现象, 电动机的负载率持续低下, 使电动机的运行效率下降, 损耗增大;

2) 负载运行存在满载、轻载、空载等情况, 而电动机的供电为不可变工频电源, 致使轻、空载运行时电动机自身的损耗较大;

3) 电动机只能工作于额定转速, 但负载需要变速运转, 变速方式是通过变速箱等机械装置来实施的, 存在电动机运行效率低下、机械传递损耗较大等缺点;

4) 电动机的本身选型原因, 或功率值与负载不匹配(选取功率偏大), 或选用老型号淘汰(效率低、耗能大)型电动机, 电动机本身的损耗较大;

5) 传动机构不够合理, 有较大的力矩传递损失。

由于以上种种原因, 电力拖动系统往往具有较大的节能潜力可供挖掘, 存在节能技术改造的较大空间。实现电力拖动系统的节能(节电)运行, 经常采用改变电动机的工作条件和工作方式的手段, 一般用变更电动机的电源、用控制设备改变电动机的运行方式、换用节能型电动机或改进传动机构的方法, 使电动机的运行效率大幅度提升, 降低轻、空载损耗, 达到节电的目的, 具体方法如下:

(1) 更改电动机的电源频率

电动机的转速取决于电源频率的磁极对数, 固定工频电源下, 一般电动机的运行速度是固定的, 电动机只有全速运行一种工作状态。在需调速的生产场所, 如果采用变频器取代工频电源为电动机供电, 输出一个频率可变的电源, 则可以实现大范围的线性调速。为了保障电动机处于恒磁通状态, 实际上变频器输出的电源频率和电压是同步变化的, 称为 VVVF 控制方式。变频运行方式, 变频器内部有直流储能环节, 功率因数接近于 1, 降速运行过程中, 电动机的运行电流和运行电压有大幅度的降低, 运行效率提高, 有显著的节电效果。

(2) 就地提供无功补偿

电力拖动系统为大功率电感性负载, 需要电网提供大量的无功电流/功率。安装电容盘/柜, 对无功功率进行补偿, 这也是从电源方面着手, 提高电网功率因数, 降低电网输送无功电源, 从而降低线路损耗、提高设备效率的一个方式。

(3) 更改电动机的供电模式

在不需要调速运行, 但电动机的负载率有较大变化范围的生产场所, 电动机经常处于轻、空载运行或满载和轻载运行呈周期性变化。由于电动机在空载和轻载时效率和功率因数最低, 自身损耗的比率较大, 如果能根据负载变化自动调配电动机的端电压, 例如满载时施加 380V 全电压, 轻载时施加 280V 达到自动降压运行, 则可以降低电动机的自身损耗, 达到节电运行目的。

采用晶闸管节能运行装置, 根据采样功率因数, 调整晶闸管的导通角, 使电动机的供电电压随负载变化而自动升降, 能显著提高电动机运行效率和功率因数, 达到比较明显的节电效果。

这是利用改变电动机的电源电压, 轻、空载时降压运行达到节能目的的方法之一。

(4) 改变控制方式

电动机实际运行功率与额定功率的比值称为电动机的负载率, 即

$$\beta = \frac{P_2}{P_N} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中, P_2 为实际运行功率; P_N 为额定功率。

由于对电动机功率的计算, 牵扯到电动机效率和功率因数, 比较繁琐。实际应用中, 可以用实际的运行电流值和额定电流值的比值, 近似得出负载率的估算值。

有些生产场所, 电动机重载时的负载率达 85% 以上, 或轻载时的负载率在 35% 以下, 而且运行较为稳定, 负荷切换不频繁, 此时利用改为电动机的绕组接法 + 改变控制方式的方法, 使轻载时电动机的绕组为星形联结状态, 即处于 220V 减压运行模式, 重载时电动机绕组为三角形联结状态, 处于全电压运行的普通工作模式, 达到轻载时节能运行的目的, 也有较好的节电效果。

这是利用改变电动机绕组接法 + 改变控制方式, 轻、空载时减压运行达到节能目的的方法之二。

(5) 更换节能型电动机

三相异步交流电动机, 从 J、JO、JR 系列到 Y 系列, 再到高效节能 (专用) 型电动机, 历经数次更新换代, 其性能和效率不断提高。JO 系列已基本淘汰掉, Y 系列电动机已成为应用最为普通的交流异步电动机。将 JO 系列的电动机更换为 Y 系列电动机, 已经具有节能意义。普通 Y 系列电动机的转差率在 5% 以内, 其力学特性较硬, 起动转矩较小, 而起动电流较大, 应用于油田抽油机机械时, 加剧了抽油机的机械疲劳程度, 使抽油机油杆断脱次数增加而增加油井的作业量, 造成综合效益下降。如采用 CJT 系列超高转差率永磁同步电动机, 取代 Y 系列普通电动机, 可以在增加起动转矩的同时降低起动电流, 减小电动机的配置功率, 减缓抽油机的机械疲劳, 降低作业次数, 产生很好的节能效果。

本书重点以上面 (1)、(2)、(3) 方法进行节能技术的装置 (设备) 为主要内容。

其中 (2)、(4) 方法, 均为电动机减压运行的节能控制方式, 下面简述其降压节能原理。

电动机在工作过程中, 其损耗包括旋转磁场在定子、转子铁心中的磁滞涡流损耗 P_{Fe} (简称损耗)、定子绕组铜耗 P_{Cu1} 、转子绕组铜耗 P_{Cu2} 、轴承摩擦和风冷损耗 P_{Δ} 以及定转子开槽等原因引起的附加损耗 P_{Cu1} 等。其中电动机的铁耗、机械损耗和附加损耗构成电动机的不变损耗, 定转子的铜耗构成电动机的可变损耗。由于定子铁耗与电动机机端电压成二次方关系, 机械损耗和附加损耗基本保持不变, 因而在运行过程中不变损耗与负载大小无关, 而电动机的可变损耗近似与负载电流二次方成正比关系, 会随着负载的增加而增加。

根据电动机学原理, 电动机的效率如下:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + (P_{\Omega} + P_{\Delta} + P_{Fe}) + (P_{Cu1} + P_{Cu2})} \quad (1-2)$$

式中, P_1 为定子绕组从电源输入的有功功率; P_2 为电动机轴上的输出功率。

由式 (1-2) 可以看出, 当电动机的不变损耗等于可变损耗时, 电动机效率最高, 此时电动机运行于额定负载附近。而当电动机运行于空载状态时, 由于不变损耗大于可变损耗, 电动机效率最低。此时适当调节电动机端电压, 使不变损耗随着负载减小而降低, 那么电动机在轻载时的不变损耗会接近于可变损耗, 电动机效率提高, 从而实现节能。

1.3 技术进步带来的节能效益和节能改造

1. 技术进步带来的节能效益

技术进步和产品的更新换代是和节能同步进行的，直流弧焊机的发展历程尤其突出。直流弧焊机的技术进步同电动机、电力变压器一样，同制作材料、工艺、产品结构、相关技术的进步是密切相关的，新型产品的出现，除了使焊接性能提升外，技术的发展同步带来了耗材省（主要表现为节约铜材）、产品体积与重量减少的节能改造优点。

本书第7章，针对旋转式直流弧焊机→整流式弧焊机→低频逆变弧焊机→中频逆变弧焊机的递进性技术升级与节能指标同步上升的现象，用具体的电子电路做出了直观展示。

2. 小型的节能改造

在工业生产乃至日常生活中，几乎时时和处处面临着节能改造的契机，采取一个简易方法就可以达到节能（节约人力、材料、时间、延长设备使用寿命等）的目的。如电焊机的空载节能、水罐液位由人工改造为自动控制等。而控制方法的改进往往和节能改造是同步进行的，由人工控制转向自动控制，由粗控制转向细控制，不仅设备的自动化控制程度提高了，而且在节能上也同时上了一个台阶。

本章第8章所涉及的温度控制、液位控制和电焊机空载节能控制、交流接触器的无声节电运行等，虽属于小型的节能改造，但都具有明显的节能（节电）效果，并且有易于实施的特点，有时一个思路上的“金点子”，就能产生一块相应的节能效益。

1.4 本书读图及其他阅读事项

本书偏重于第一手电路资料（节能电器具体的电子电路），书中大部分图样全部为实际测绘电路，而且所涉及电器设备，是20世纪90年代至近几年来，在工业控制领域大量应用且现在还在使用和运行当中的电器设备。目前的电子设备的生产，由于各种原因，出现各厂家标注不一的状况。因而本书标注以实物，在尽量向标准看齐的情况下，部分电路板上的元器件标注仍以实际标注为准。便于与实物（电子设备）对应，利于实际的故障检修。

1. 电路中元器件的符号标注

（1）集成电路的标注法

一般标注为IC，如IC1、IC2…。但有些实例中，采用实际标注为D1、D2…，U1、U2…，N1、N2…。IC的器件引脚号和功能字符，一般尽可能地标出，省去读者查找电路资料的麻烦。

某片集成电路，如LF353，内含两组运算放大器电路，当其作为一个整体器件出现在图样中时，标注为U3（见图1-1）。但有时为分析信号流程的方便，将其拆分为两个独立的运放电路，则更改标注为N1、N2，并附加N1/N2：LF353的文字说明（见图1-2）。

或采取如图1-2所示中的右图标注法，分别将同属一个器件序号的两级运放电路标注为U3 LM353 1/2 和 U2 LM353 1/2，意为该两级电路各为U3电路的一部分。

若集成电路内含四级运放电路（如LM324），则分别标注为N1、N2、N3、N4，并加以N1/N2/N3/N4：LF324。或标注为U1 LM324 1/4、U1 LM324 2/4、U1 LM324 3/4、U1

LM324 4/4。

对数字 IC 电路的标注原则，与此相同。

(2) 晶体管/二极管，一般以 VT + 数字的方式进行标注，部分电路采用与实物相符的标注法，如标注为 BG1 + 数字，有的标注为 Q + 数字（如 Q1、Q5 等）。

二极管标注为 D，部分电路标注为 VD（系制造厂商为区分电路功能而特意标注的）。稳压二极管标注为 DW 等，也是依据所测绘电路实物为准的。

(3) 无序号元器件的标注

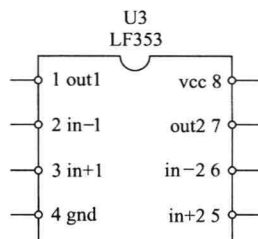


图 1-1 集成电路元器件序号与型号标注法 1

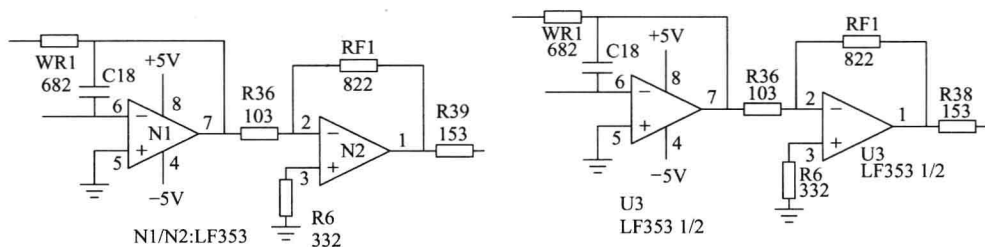


图 1-2 集成电路元器件序号与标注法 2

有些电路板实物无元器件序号的标注，图样中也仅标出元器件的规格，如 $1\text{k}\Omega$ 电阻元件，标注为 1k，一般不标注序号； $100\mu\text{F}25\text{V}$ 电容元件标注为 $100\mu\text{F}25\text{V}$ ，一般不标注序号。

但这为电路原理（信号流程）的分析带来不便，此种情况下，仅对部分重要元器件按序号标出，如以信号流程对电阻元件标以 R1、R2、R3…，或针对相关集成电路，标注 U1、U2、U3…，对无碍原理分析和故障检修分析的元器件，则不予标注。这是作者“不得已而为之”的自行标注，部分元器件的序号标注与实际电路上的元器件顺序无法对应。

(4) 接线端子排的标注

有的电路接线端子原无标号，为图示和叙述方便，暂且由作者自定义端子号，在图上标出，在文中叙及该端子号和功能时，以“（自定义）”字样来说明。

2. 图与图之间的衔接问题

工业电器设备整机电路往往由多块电路板组合，每块电路板上的电路构成书中已有文字说明。

本书为读图和电路原理分析的方便，是以信号传输流程为序，逐一画出各块电路图，各集成器件，可以拆分的（如四运放 LM324、六反相器 CD4069 等），便以独立器件的形式画出（将 LM324 拆分为 4 个独立的放大器电路，将 CD4069 拆分为 6 个独立反相器电路画出）与制造厂商设计（安装）图样的画法有所不同。

因于本书印张尺寸的限制，和便于信号分解的缘故，整机电路又被拆分为数个局部（功能）电路，这样带来读图——图与图之间的（信号）衔接——的问题。

(1) 图与图之间用数字 + 字母标注相衔接

如图 1-3 所示，基准电压源 N5 输出的 5V 基准电压、运算电路 N2 - 2 ~ N2 - 4 输出的 3 路信号，分别进入 MCU 芯片的 35 ~ 37、8 脚，用数字 + 字母标注方式，指示其信号去向。

其中数字代表 MCU 的引脚序号, 字母为该引脚功能的标注。在其他相关 MCU 芯片的电路中, 相关 MCU 芯片引脚不再重复画出。

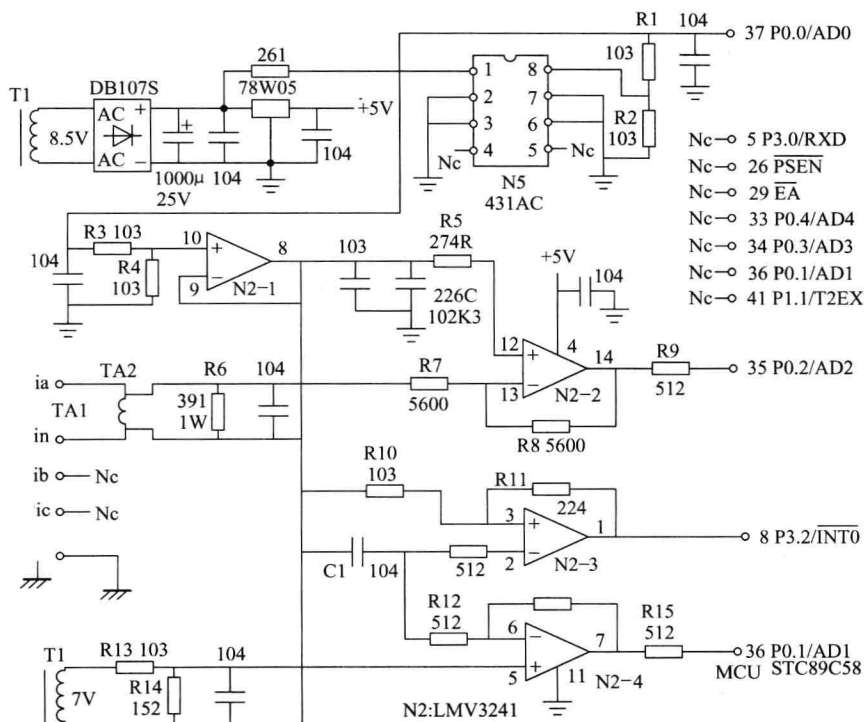


图 1-3 读图 (衔接) 示意图 1

(2) 图与图之间用文字说明相衔接

如图 1-4 所示, 电位器 RP2 固定臂的上端引入前级电路来的“电流检测信号”, 而前级电路在电流检测信号输出端也进行了“电流检测信号”的相同标注, 由此可以确定为电路/信号的衔接点, 找到两图之间的信号联系。

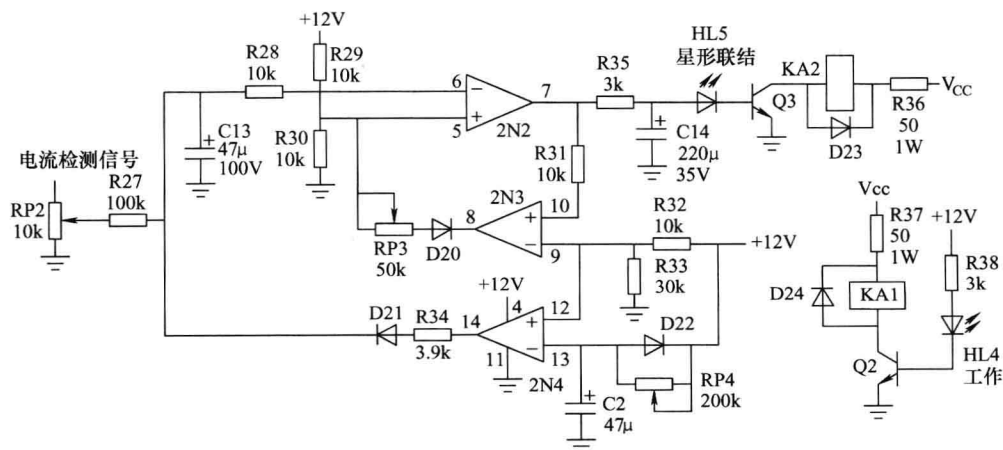


图 1-4 读图 (衔接) 示意图 2

3. “(试分析)”文字说明

电路原理与故障分析,因牵扯不能解析程序软件及手头已无实物,进行实际检测确认等多方面原因,无法得出较为明晰的定论,文字讲述可能有不确定或失误之处,添加“(试分析)”字样,以引起读者注意。因手头资料多为一手原创资料,不易找到可供参考的厂家提供的或相关的权威技术资料。有时不得已进行的电路原理分析,是作者勉力而为的。

4. 图样及文字中可能有的失误

由于客观条件和本人技术能力所限,本书测绘图样可能有失误之处,依据测绘图样所做出的原理分析也有不确定之处。出现失误的可能原因如下:

1) 电路图样的测绘是在维修过程中进行的,机器一经修复,即为用户取走,图样与电路板来不及细致核对,有可能出现测绘失误。

2) 测绘出于维修目的,并非是将电路板上的元器件全部拆除后才行测绘的。由于IC等元器件的遮盖,可能遗漏了铜箔条的连接,或遗漏了数只贴片电阻、贴片电容等元器件。虽然作者在分析电路原理之后尽最大努力进行了“补漏”,但仍有存在遗漏的可能。

3) 原电路设计者的错误。这是值得注意的一点,即使是成品电路,仍可能有错误存在。为反映电路原貌,将相关电路也一并绘出。

4) 本人的疏忽和能力所限,图样和图说中,或有错讹和见地不真之处。

以上各点敬请读者留意。

第2章 无功功率动态补偿装置

无功电源和有功电源一样，是保证电力系统电能质量和安全供电所不可缺少的。无功电源不足将使系统电压降低，严重时会造成电压崩溃。另外，功率因数和电压的降低，会造成电气设备得不到充分利用，电能损耗增加，效率降低，限制了电路的送电能力，因而解决电网无功电源容量不足，提高功率因数是保证电力系统安全运行的重要措施。

电力系统中除了负载（主要指交流电动机）需要无功功率外，电路的电感、电抗和变压器的电感、电抗也都要消耗无功功率。除了发电机是无功功率的主要电源外，电路的电容也产生部分无功功率，在以上两项无功电源不足以满足负载的无功功率和电网的无功功率损耗时，需加装无功功率补偿设备，例如加装同期调相机、移相电容器和无功静止补偿装置等，这些补偿设备也是无功功率的电源。

无功功率对公共电网的影响如下：

- 1) 增加设备容量。因为电网要提供无功功率给电感负载（或电容负载），这必然会使得电源的带载能力降低，只有增大电源设备容量，才能完成供电任务。
- 2) 增加设备及线路损耗。无功电流流经供电线路，在线路电阻上产生有功损耗。另外，使供电设备（如变压器）的内部损耗加大。
- 3) 使线路及变压器的电压降增大。如果是冲击性的无功功率负载，还会造成电压的剧烈波动，使供电质量降低。

2.1 电容无功补偿的原理

1. 感性无功和容性无功

电网中电力设备大多是根据电磁感应原理工作的，它们在能量转换过程中建立交变的磁场，在一个周期内吸收的功率和释放的功率相等。电源能量在通过纯电感或纯电容电路时并没有能量消耗，仅在负载与电源之间往复交换，在三相之间流动，由于这种交换功率不对外做功，因此称为无功功率。

从物理概念来解释感性无功功率：由于电感线圈是贮藏磁场能量的元件，当线圈加上交流电压后，电压交变时，相应的磁场能量也随着变化。当电压增大，电流及磁场能量也就相应加强，此时线圈的磁场能量就将外电源供给的能量以磁场能量形式贮藏起来；当电压减小，电流和磁场能量减弱时，线圈把磁场能量释放并输回到外面电路中。交流电感电路不消耗功率，电路中仅是电源能量与磁场能量之间的往复转换。

从物理概念来解释容性无功功率：由于电容器是贮藏电场能量的元件，当电容器加上交流电压后，电压交变时，相应的电场能量也随着变化。当电压增大，电流及电场能量也就相应加强，此时电容器的电场能量就将外电源供给的能量以电场能量形式贮藏起来；当电压减小和电场能量减弱时，电容器把电场能量释放并输回到外面电路中。交流电容电路不消耗功率，电路中仅是电源能量与电场能量之间的往复转换。

实际供用电系统中的电力负载并不是纯感性或纯容性的,是既有电感或电容、又有电阻的负载。感性无功:电流矢量滞后于电压矢量 90° ,如电动机、变压器、晶闸管变流设备等;容性无功:电流矢量超前于电压矢量 90° ,如电容器等。

2. 功率因数的概念

电网中存在无功分量(以感性无功为主)时,说明负载的电压和电流的相量之间存在着一定的相位差,相位角的余弦 $\cos\varphi$ 称为功率因数。它是有功功率与视在功率之比。当电网的电压矢量为 U ,负载电流的矢量为 I ,它们之间的相位角为 φ ,如图 2-1a 所示。若电力负荷的视在功率为 S ,有功功率为 P ,无功功率为 Q ,那么它们之间的关系如图 2-1b 所示。

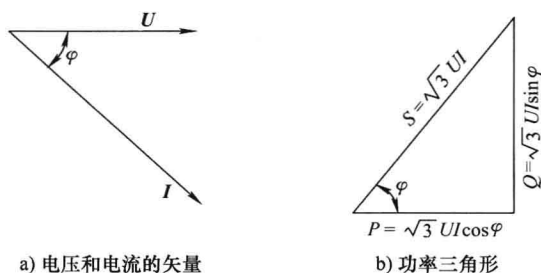


图 2-1 视在功率、有功功率和无功功率的关系

三相功率因数的计算公式为

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2-1)$$

式中, $\cos\varphi$ 为功率因数; P 为有功功率, kW; Q 为无功功率, kvar; S 为视在功率, kVA。

另外,功率因数通常分为自然功率因数、瞬时功率因数和加权平均功率因数 3 种。

1) 在三相对称电路中,各相电压、电流为对称,功率因数也相同。那么三相电路总的功率因数就等于各相的功率因数。

2) 非正弦电路的功率因数。

$$P = UI_1 \cos\varphi_1 \quad Q = UI_1 \sin\varphi_1 \quad S = UI \quad (2-2)$$

此时非正弦电路功率因数为

$$\lambda = \frac{P}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos\varphi_1 \quad (2-3)$$

式中, $\cos\varphi_1$ 为基波功率因数; I_1 为基波电流; I 为总电流。

由式 (2-3) 可以看出,功率因数是由基波电流相移和电流波形畸变两个因素决定的。总电流可以看成由 3 个分量,即基波有功电流、基波无功电流和谐波电流组成。

电力系统中,不但有功功率要平衡,无功功率也要平衡。由式 $\cos\varphi = P/S$ 可知,在一定的有功功率下,功率因数 $\cos\varphi$ 越小,所需的无功功率越大。为满足用电的要求,供电线路和变压器的容量就需要增加。这样,不仅要增加供电投资、降低设备利用率,也将增加线路损耗。为了提高电网的经济运行效率,根据电网中的无功类型,人为地补偿容性无功或感性无功来抵消线路的无功功率。

功率因数是电力系统的一个重要的技术数据。功率因数是衡量电气设备效率高低的一个

系数。功率因数低,说明电路用于交变磁场转换的无功功率大,从而降低了设备的利用率,增加了线路供电损失。所以,供电部门对用电单位的功率因数有一定的标准要求。

无功补偿的主要作用就是提高功率因数以减少设备容量和功率损耗、稳定电压和提高供电质量,在长距离输电中提高输电稳定性和输电能力以及平衡三相负载的有功和无功功率。安装并联电容器进行无功补偿,可限制无功功率在电网中的传输,相应减少了线路的电压损耗,提高了配电网的电压质量。

3. 无功补偿的概念

如果电网的有功功率 P 不变,由于加装了一部分无功补偿设备,使无功损耗由 Q 减少至 Q' ,功率因数值由 $\cos\varphi$ 提高到 $\cos\varphi'$,如图 2-2 所示。那么 $Q - Q'$ 就叫做无功补偿的容量。也可以看到,加装了无功补偿设备以后,视在功率 S' 也比 S 减小了。

4. 无功补偿的作用

电力系统功率因数提高以后,具体效益主要有以下 3 个方面:

(1) 能够减少线路损失

当电流流过供电线路时,会因线路电阻产生有功损耗。其有功功率的损失和功率因数的二次方成正比,提高功率因数可以大量降低线损。当系统功率因数由 0.6 提高到 0.8 时,铜损将近下降一半。

(2) 可以减少系统元件的容量,提高电网的输送能力

提高功率因数可以减少无功输送量,在输送同样的有功功率情况下,(电源)设备安装容量可以减少,理想状态下,可使发电机按照额定容量输出。一般发电机的额定功率因数为 0.8 以上,如果低于额定功率因数运行,受定子及转子电流的限制,发电机的千伏安容量和有功功率都要降低,使其处于不经济的运行状态;提高功率因数可以提高电源变压器的带载能力,当电网功率因数提高时,需要馈送的无功电流值减小,相当于提升了电源变压器的带载能力,提高变压器的利用率,减少投资。

(3) 可以改善用户的电压质量

提高系统功率因数,减少线路输出的无功功率/电流,则线路的电压损失将有所下降,因此改善了电网和用户的电压质量。目前有些电网电压波动幅度过大,及用户供电端电压过低的主要原因是,用户的大量无功负载和电网的电压降,造成无功补偿容量的不足;长距离输送无功功率,而又缺乏调压设备;电网功率波动幅度较大等。

如果做好无功补偿工作,实现无功功率及无功网损就地供应,并配合适当安装带负载调压的变压器,低电压运行和电压波动现象就能得到有效的改善。

另外,用户端做好无功补偿工作,可以提高电源变压器的利用率,并带来以下好处:

- 1) 可避免因功率因数低于规定值而受罚。
- 2) 可减少用户内部因传输和分配无功功率造成的有功功率损耗,电费可相应降低。

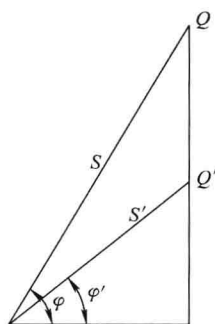


图 2-2 无功补偿概念的示意图

2.2 无功补偿的方式

为了使电网安全经济运行和用户的正常供电,首先要从减少大量无功功率的流动入手,因此无功补偿的基本原则就是尽量使用户的无功负载和电网无功损失就地供应: