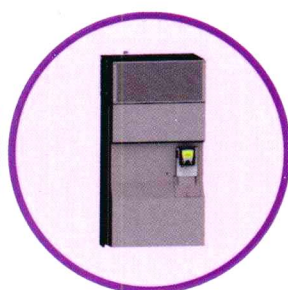
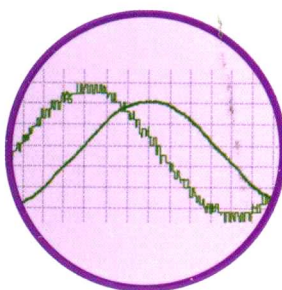
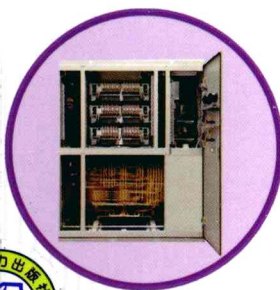


变频器 软起动器

电路设计宝典

BIANPINQI RUANQIDONGQI
DIANLU SHEJIBAODIAN

李 利 编著
张登山 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



变频器 软起动器 电路设计宝典

李 利 编著
张登山 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共 8 章, 主要内容包括变频器、软起动器的基本原理, 变频器、软起动器各种选件的功能及选配方法, 以施耐德电气公司的变频器 ATV21、ATV61/ATV71 和软起动器 ATS48 为例, 详细分析了变频器和软起动器一次电路和二次电路设计中的各种常见错误, 并给出了正确的设计。附录部分还提供了一些常见负载的分类方法和一些常见问题的解答。

本书以应用为目的, 强调实用性, 书里提供了大量的工程应用方案, 并给出了应用图, 方便读者学习参考。

本书特别适用于刚接触变频器、软起动器电路设计的工程技术人员, 同时也可供广大电气设计人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频器、软起动器电路设计宝典/李利编著. —北京: 中国电力出版社, 2010. 11

ISBN 978-7-5123-0793-3

I. ①变… II. ①李… III. ①变频器-电路设计②起动器-电路设计 IV. ①TN773.02②TM573.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 163402 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 15 印张 207 千字 1 插图

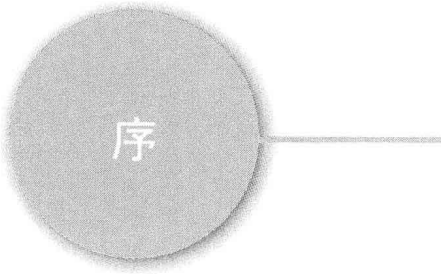
印数 0001—3000 册 定价 45.00 元 (含 1CD)

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究





序

本书作者李利，现任职于施耐德电气（中国）投资有限公司，多年来一直从事一线技术工作。在日常工作中，收集、积累了大量一手技术资料和现场应用经验，利用业余时间编著成此书。

本书从变频器和软起动器初学者的角度出发，结合工程实际应用，基于施耐德公司变频器 ATV21、ATV61、ATV71 和软起动器 ATS48，详细介绍了变频器和软起动器的原理、选用、安装调试、维护、工程应用等内容。本书避开了繁杂的理论公式，重在实用，强调物理概念与实际工程相结合，文字通俗，简单易懂，对快速掌握变频器和软起动器应用技术将会有很大的帮助。

另外本书基于实际工程应用出发，重点介绍了施耐德电气公司变频器和软起动器的特殊应用方案和各种行业解决方案。这些解决方案为广大电气设计人员和电气工程技术人員提供了很好的参考。本书也分析了在实际工程实践中，变频器和软起动器招标文件中容易出现的问题，给出了正确的描述，并且在附录部分提供了变频器和软起动器招标技术规范范本，方便设计人员在实际工作中参考选用。本书是电工、电气设计人员不可多得的读本，既可以作为电气传动、自动控制领域从事变频器调试与维修的工程技术人员工程参考书或自学教材，同时也可作为高等学校相关专业的参考书。

施耐德电气（中国）投资有限公司变频器市场部总经理

张登山 博士，高级工程师

2011 年 4 月

前 言

变频器、软起动器与现代工业生产和人们的日常生活联系非常紧密。在钢铁、冶金、石油开采、石油冶炼、水泥、造纸、水处理等工业行业，以及在商场、办公楼、写字楼、会议中心、住宅、生活供水等民用建筑中，变频器、软起动器的大量应用，既大大提高了劳动生产率，又满足了人们日常生活的需要，同时实现了运行节能。

本书以应用为目的，强调实用性，以弥补现有变频器、软起动器书籍在电路设计内容上的不足。

本书共有 8 章。第 1 章详细阐述了变频器、软起动器的基本原理，说明了变频器和软起动器功能的差异。第 2 章详细说明了变频器和软起动器各种选件的功能及选配方法，详细讲解了很多相关知识，如变频器线路接触器的作用及控制方法；变频器产生谐波电流的原因及危害，各种谐波电流抑制选件的原理及功能差异；变频器产生电磁干扰的原因、危害及抑制选件；变频器输出产生过电压的原因及危害，各种 du/dt 抑制选件的原理及功能差异；变频器选配制动能量释放选件的原因及选配方法等。通过这些内容，便于从应用的角度，从本质上掌握变频器、软起动器各种选件的功能、选配依据和使用方法。第 3 章详细讲解了各大公司中压变频器的原理、基本结构。第 4 章以施耐德电气公司的变频器 ATV21、ATV61/ATV71 和软起动器 ATS48 为例，详细分析了变频器、软起动器一次电路和二次电路设计中的各种常见错误，指出了错误设计导致的后果，并给出了正确的设计。第 5 章分析了变频器、软起动器招标技术规范书中常见的错误描述，并给出了正确的描述。第 6 章为变频器、软起动器典型应用一次、二次图。第 7 章为施耐德电气变

变频器、软起动器特殊应用方案。第8章为变频器、软起动器工程应用方案，这些应用方案可供广大电气设计人员和电气工程技术人員参考。附录部分提供了变频器、软起动器招标技术规范书范本，供读者参考选用，同时还提供了常见负载的分类方法和一些常见问题的解答。

本书中有关变频器 ATV21 的原理、功能特性、电路设计等内容，适应于其升级产品 ATV212。

本书特别适用于刚接触变频器、软起动器电路设计的工程技术人员，同时也可供广大电气设计工程人员参考。

本书在编写和出版过程中，得到施耐德电气 P&E 事业部副总裁曹玮、P&E 事业部南方区总经理王健、施耐德电气人力资源总监乐海雯、P&E 事业部市场推广部总监张连权、P&E 事业部 ICC 产品推广经理吉湘赋、P&E 事业部西南区总经理张毓、P&E 事业部西南区四川地区经理周田、P&E 事业部西南区重庆地区经理邓百舸、P&E 事业部铁路行业经理杨海龙、P&E 事业部南方区广东区经理叶剑辉、P&E 事业部广东区设计院经理李永泉、IS 事业部运动控制及变频器市场部总经理张登山、IS 事业部 OEM 经理徐骏等领导的亲切关怀和大力支持。在此，作者表示诚挚的谢意和由衷感激！此过程中还得到 P&E 事业部成都办经理及同事李陈、徐军鹏、吴益、杨汝明、赵健、黄海、姜宏、桓为刚、江曲、任雯波、蒲宏、朱云、荣明慧、冯梅、苏坚、李海涛，重庆办经理及同事代国栋、杨博、宴远春、刘奇鑫、杨春华、万承农等，P&E 事业部贵州办经理及同事冯晓军、周治勇、张颀等的大力支持，在此一并致谢！

限于作者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正，作者不胜感激。

作者 李利

2010 年 10 月

目 录

序 前言

1

变频器、软起动器基本原理 \ 1

- 1.1 变频器基本原理 \ 1
- 1.2 软起动器基本原理 \ 3
- 1.3 变频器、软起动器的区别 \ 5

2

变频器、软起动器选件功能说明 \ 9

- 2.1 变频器选件功能说明 \ 9
 - 2.1.1 变频器主回路接触器 \ 11
 - 2.1.2 变频器输入侧谐波电流抑制选件 \ 12
 - 2.1.3 变频器输出侧 du/dt 抑制选件 \ 24
 - 2.1.4 变频器 EMC 滤波器 \ 38
 - 2.1.5 变频器制动能量释放选件 \ 39
 - 2.1.6 变频器其他选件 \ 42
- 2.2 软起动器选件功能说明 \ 43
 - 2.2.1 进线接触器和旁路接触器 \ 44

2.2.2 快速熔断器 \ 45

2.2.3 进线电抗器 \ 46

2.2.4 通信模块 \ 46

3

中压变频器 \ 49

3.1 中压变频器基本原理 \ 49

3.2 中压变频器技术实现 \ 49

4

施耐德电气变频器、软起动器一次图常见错误设计 \ 69

4.1 施耐德电气变频器一次图常见错误设计 \ 69

4.1.1 施耐德电气变频器 ATV21 一次图常见错误设计 \ 69

4.1.2 施耐德电气变频器 ATV61 一次图常见错误设计 \ 72

4.1.3 施耐德电气变频器 ATV71 一次图常见错误设计 \ 74

4.2 施耐德电气软起动器 ATS48 一次图错误设计 \ 75

4.3 施耐德电气变频器、软起动器二次图常见错误设计 \ 78

4.3.1 施耐德电气变频器 ATV21 二次图常见错误设计 \ 80

4.3.2 施耐德电气变频器 ATV61/71 二次图常见错误设计 \ 86

4.3.3 施耐德电气软起动器 ATS48 二次图常见错误设计 \ 97

5

变频器、软起动器招标技术规范书注意事项 \ 101

5.1 变频器招标技术规范书注意事项 \ 101

5.2 软起动器招标技术规范书注意事项 \ 106

6

变频器、软起动器典型应用一次、二次图 \ 109

7

施耐德电气变频器、软起动器特殊应用方案 \ 175

8

变频器、软起动器工程应用方案 \ 189

附录 A 变频器招标技术规范书（适用于工业离心风机、离心泵） \ 207

附录 B 变频器招标技术规范书（适用于建筑离心风机、离心泵） \ 211

附录 C 软起动器招标技术规范书 \ 213

附录 D 6kV 中压变频器招标技术规范书（适用于离心类负载） \ 216

附录 E 10kV 中压变频器招标技术规范书（适用于离心类负载） \ 218

附录 F 负载分类 \ 220

附录 G 常见问题及解答 \ 223

1 变频器、软启动器基本原理

1.1 变频器基本原理

交—直—交型变频器的理论基础为“面积等效原理”，即冲量（窄脉冲面积）相等而形状不同的窄脉冲，加在具有惯性的同一环节上，其效果基本相同。这里所说的“效果基本相同”，是指环节的输出响应波形基本相同。将一系列电压脉冲的宽度按正弦规律进行调制，加在电动机绕组端，回路中电流波形为正弦波。

如图 1-1 所示的三个形状不同的窄脉冲，它们的面积（即冲量）都相等，将它们加在具有惯性的同一环节上时，其输出响应基本相同。

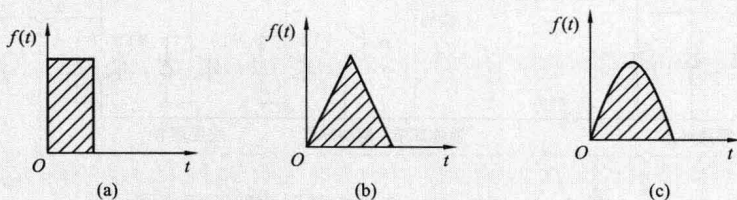


图 1-1 三种脉冲波形

(a) 矩形脉冲；(b) 三角形脉冲；(c) 正弦脉冲

常见的正弦波脉宽调制（SPWM），是指脉冲幅值相等，脉冲宽度按正弦规律变化，并与正弦波等效的 PWM 波形。这里所说的等效，是指这些矩形波脉冲和相应的正弦波部分面积相等。如图 1-2 所示，将一系列按 SPWM 法则调制的电压脉冲加在电动机端，回路中的电流波形就是正弦波。

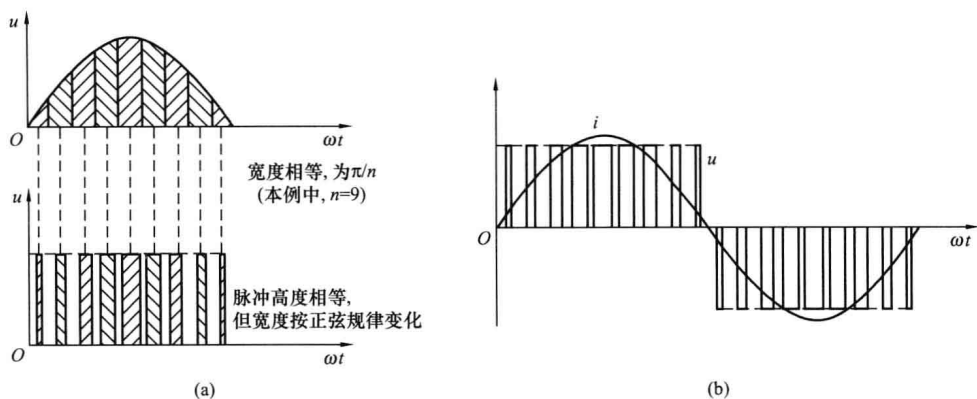


图 1-2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 波形

以上就是变频器的基本原理。

交一直—交型变频器的主回路原理图如图 1-3 所示。

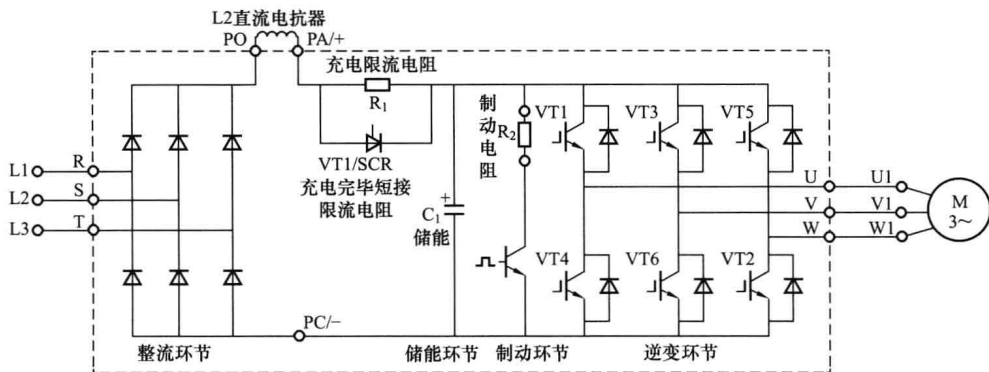


图 1-3 交一直—交型变频器主回路原理图

“面积等效原理”深刻揭示了变频器的本质。

交一直—交型变频器需要利用二极管或晶闸管将三相正弦波电压整流为直流，加上利用电容稳压储能，所以其输入侧一定会产生谐波电流。

交一直—交型变频器的输出电压是矩形波脉冲，在脉冲前后沿 du/dt （即电压变化率）非常大，所以其输出一定会产生过电压。

交一直—交型变频器输入部分——整流环节产生的谐波电流，和输出部

分——逆变环节产生的矩形脉冲电压，和电缆中电流的谐波分量会产生电磁干扰，所以变频器需要 EMC 滤波器减小其产生的电磁干扰，同时减小其运行环境中电磁干扰对变频器自身的影响。

当电机运行在电动机状态时，电能由变频器传递到电动机；当电机处于发电机或电磁制动状态时，电能由电动机反馈回变频器。由于变频器输入侧采用了具有单向导通性的二极管或晶闸管，反馈回的能量不能输送回电网，从而使得变频器内部直流母线电压升高。所以变频器一般需要制动晶体管（或制动单元）+制动电阻（或起重电阻）构成制动电路，将这些能量以热能的形式释放；或需要能量反馈单元，将其逆变成交流电反馈回电网。这部分能量如果不能及时有效释放，势必会使得变频器内部直流母线电压持续升高，以至于将内部储能电容击穿，从而使得变频器损坏或爆炸，造成严重后果。

1.2 软起动器基本原理

软起动器本质上是一种降压起动器，其基本原理是通过降低电动机端的起动电压，以减小起动电流和机械冲击，并实现对电动机平滑起动。常见的电子式软起动器采用“削波”来实现对电动机的降压起动。

一般说来，软起动器主回路由 6 个单向晶闸管或 3 个双向晶闸管构成，如图 1-4 所示。起动过程中，通过控制晶闸管的触发角 α 由大变小，使得输出电压逐渐增加。当 $\alpha=0^\circ$ 时，晶闸管输出全电压。软起动器起动过程中的削波降压原理如图 1-5 所示。软起动器一般需要旁路运行，这样既可大大减小软起动器晶闸管的热耗散功率，还可保护晶闸管免受浪涌电压的冲击而损坏。

软起动器本质上是一种降压起动装置，由于软起动器没有改变输出电压的频率，所以在降压起动的同时，一定会降低起动转矩。一般情况下，软起动器可将起动电流限定在额定电流的 3 倍或 4 倍以内，起动转矩一般为额定转矩的 0.2~0.4 倍。

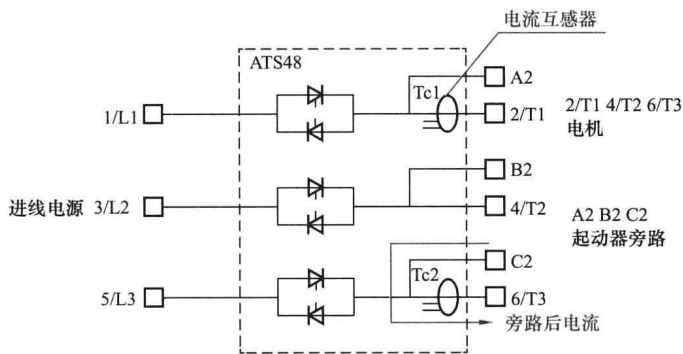


图 1-4 软起动器 (ATS48) 主回路电气原理图

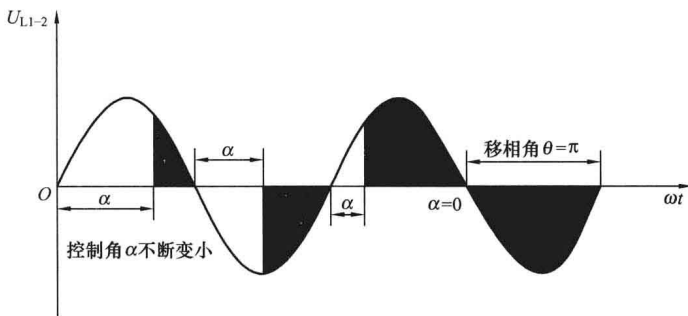


图 1-5 软起动器削波降压原理图

图 1-4 所示是施耐德电气公司的软起动器 ATS48 主回路电气原理图，需要注意的是，旁路接触器的下端头必须接软起动器的旁路端子 A2 - B2 - C2，而不能接到电机电缆接线端子 2/T1 - 4/T2 - 6/T3。否则软起动器起动结束切换到旁路运行时，报“缺相”故障，从而不能运行。

软起动器的控制类型有多种，目前市面上常见的软起动器有电压型、电流型和转矩控制型。电压型和电流型软起动器可归为传统型软起动器。虽然各种类型的软起动器的基本技术原理都相同，但因为控制对象不一样，所以各种软起动器性能差别很大。电压型、电流型软起动器由于控制对象是电压或电流，所以控制简单、性能较差，如存在起动电流过大、电机发热严重、起动速度曲线为二次曲线，软起、软停性能差等弊端，并且某些型号的软起

动器旁路后需要另加热继电器做过载保护。

而转矩控制型软起动器以电动机输出的电磁转矩为控制对象，加速转矩在整个起动过程中可以保持为恒值，所以起动速度可以线性增加到额定值，从而大大减小机械冲击，有效消除机械应力，可最大限度延长机械设备的使用寿命。软停时，力矩控制可有效地控制电动机转速线性减小，以消除水锤效应，从而延长水泵、阀门的使用寿命。

转矩控制（TCS）是施耐德电气公司的专利技术，ATS48 是一款典型的转矩控制型软起动器，这款软起动器性能优良、功能发达。理想负载为离心风机、离心泵等变转矩负载。因其过流能力很强，对于不要求调速的普通恒转矩负载，如活塞泵、罗茨风机、传送带等，也可以选用 ATS48 作为驱动器。

1.3 变频器、软起动器的区别

变频器、软起动器有本质区别，本节从 6 个方面做了讲述。

1. 基本原理不同

变频器的基本原理是“面积等效原理”，即用一组矩形脉冲电压来代替一个正弦波电压。

软起动器的基本原理是“削波降压原理”，即通过输出不完整的正弦波电压以减小起动电压，从而减小起动电流。

由于变频器、软起动器的基本原理不相同，这就从根本上决定了变频器、软起动器技术实现不同。

2. 技术实现（主电路结构）不同

变频器主电路为交—直—交结构，即由整流环节（二极管或晶闸管）、稳压储能电容、制动环节（有的变频器无）、逆变环节（IGBT）等几部分组成（见图 1-3）。

软起动器主电路一般是 3 个双向晶闸管或 6 个反并联的晶闸管（见图 1-4）。

软起动器原理和主电路的结构决定了软起动器自身不可能有制动晶体管（或制动单元）和制动电阻这样的选件。

3. 输出电压波形不同

变频器输出电压波形为矩形脉冲，在脉冲的前后沿， du/dt （电压变化率，即电压对时间的微分）会非常大，这是变频器输出产生过电压的根本原因。变频器输出电缆（电动机电缆）超过 50m（对于 400V 三相供电而言，下同），需要加装电动机电抗器；超过 300m，需加装正弦滤波器。具体选配时应查阅所用变频器的技术资料。

软起动器在起动过程中输出电压是有缺口的正弦波形，其 du/dt 为余弦，形式不变。所以对于软起动器，没有“输出过电压”一说。软起动器起动完毕，输出电压与输入电压相同，为完整的正弦波形。

4. 起动电流不同

根据“面积等效原理”，变频器输出回路中的电流波形为正弦波。在起动过程中，起动电流由很小的值 [与起动频率和加速时间有关，通常可认为初始起动电流 $I_s \leq 0.1 I_e$ （额定电流）]，逐渐增大到额定值。实际运行中，如果变频器输出没有加装选件（电动机电抗器或正弦滤波器），电流波形会有一定的失真，有很多毛刺，比较杂乱（可参考图 2-11）。如果加装了电动机电抗器或正弦滤波器，回路中电流会是很标准的正弦波，尤其是加装了正弦滤波器，电流的正弦波形几乎看不到一点毛刺或失真。

软起动器输出回路电流波形与电压波形相同：在起动过程中，输出回路中的电流波形是有缺口的正弦波，起动电流由较大的值 [一般情况下，起动电流 $I_s = (3 \sim 4) I_n$ （ I_n 是软起动器的额定电流）]，逐渐减小到额定值；起动过程结束后，电流波形是完整的正弦波。

5. 起动转矩不同

变频器起动频率一般是 0Hz，但起动转矩 $T_s \geq 0.5 T_n$ （额定转矩），起动过转矩能力一般可达 $(1.3 \sim 1.7) T_n$ 。如果是高端变频器，其过转矩能力可达 $2.2 T_n$ 。例如，施耐德电气公司的 ATV71 变频器加编码器闭环控制，

还可以在 0Hz 时输出连续的额定转矩（即静止转矩）。

软起动器起动时由于降低了起动电压，而电压频率并没有改变，所以一定会降低起动转矩，一般情况下， $T_s = 0.4T_n$ 。即便是采用突跳起动（持续 100ms，即两个周波内输出全电压），也没有从根本上提高起动转矩。

6. 调节的参数不同

电动机的转速为

$$n = n_0 \times (1 - s) = 60 \times f \times (1 - s) / p$$

式中 f ——频率；

s ——转差率；

p ——电动机的极对数。

变频器调节的参数为频率 f ，是效率最高的一种调速方式。

而软起动器调节的参数为转差率 s ，是效率最低的一种调速方式。

在工程应用中，第 3~5 条非常有价值，需予以特别关注。

变频器与软起动器的区别如表 1-1 所示。

表 1-1 变频器与软起动器区别一览表

序号	类别	变频器	软起动器	备注
1	基本原理	“面积等效”原理，即用一系列矩形脉冲电压代替一个完整的正弦波电压	“削波降压”原理，即通过输出不完整的正弦波电压以减小起动电压，从而减小起动电流	
2	主电路结构（技术实现）	由整流环节（二极管或晶闸管）、稳压储能环节（电容）、制动环节（有的变频器无）、逆变环节（IGBT 或其他全控型器件）等几部分组成	一般是 3 个双向晶闸管或 6 个反并联的晶闸管	变频器输入侧一定会产生谐波电流，但软起动器只有在起动、软停（或制动停机）过程中才会产生谐波电流，起动完毕旁路运行，软起动器不再产生谐波电流
3	输出电压波形	幅值相等，宽度按正弦规律变化的一系列矩形脉冲	起动过程中电压波形是有缺口的正弦波，起动完毕旁路运行，则输出完整的正弦波	变频器输出侧一定会产生过电压。过电压的大小与变频器开关频率、电缆长度和电缆类型有关。变频器输出电压不能通过模拟式电压表测得

续表

序号	类别	变频器	软起动器	备注
4	输出电流 波形	(不规整的) 正弦波	与电压波形相同	变频器输出侧加装了电动机抗器或正弦滤波器, 尤其是后者, 电流正弦波形会很规整
5	起动转矩	起动转矩 $T_s \geq 0.5T_n$, 起动过程转矩能力一般 可达 $1.3 \sim 2.2T_n$	一定会减小起动转矩, 一般情况下, $T_s = 0.4T_n$ 。即便是 采用突跳起动也没有 从根本上提高起动 转矩	
6	调节的参数	频率 f , 效率高	转差率 s , 效率低	