

矩阵式晶闸管分频调速节能装置研究

赵振喜¹,刘连光¹,周建博²

(1. 华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室,
北京 102206;2. 西安电力高等专科学校,陕西 西安 710032)

摘要:分频调速是一种崭新的节能方法。介绍了分频调速的涵义,给出了主电路和矩阵式电子开关原理图,指出分频电路的 9 只双向晶闸管可分为三组,随后定义了开关函数 S 和开关矩阵 S ,并推导了分频电路的实现原理。其次介绍了在实现过程中需要重点解决的两大关键技术:一是在自然换相点处的电压过零触发和电流过零触发方式减少了内存占用;二是利用逻辑电路构成防误触发措施,根据脉冲的特点列出了真值表,并以此为依据设计了逻辑电路。从使用中验证,该装置对有级调速的风机、水泵负载是低投入、高回报的选择。

关键词:分频调速;过零触发;逻辑电路;节能装置

中图分类号: TM 721

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)06-0049-04

风机、水泵是量大面广的通用流体机械设备,使用挡板或阀门控制流量浪费大量电能^[1,2]。而普通变频器价格较高,阻碍了变频调速技术的推广应用^[3]。针对风机、水泵负载允许有级调速的特点,研制了矩阵式分频调速装置(DFSR)。这种装置具有使用器件少、成本低等优点;在实现电动机分频调速控制的同时,具有电动机运行参数和运行状态监测功能。

1 分频调速涵义

三相电压波形图中,任何两相电压波形所围成的在其连续两个等值点中间的这一段三相电压波形称为一个波形单元,电压等值点称为自然换相点。如图 1 所示。

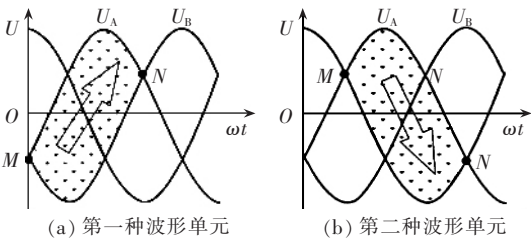


图 1 分频运行方式图解

Fig.1 The sketch diagram of divided-frequency operation mode

图 1 中 M, N 是自然换相点,在这 2 点处 $U_A=U_B$, A, B 相在 M, N 中间的一段波形是电压 U_A, U_B 围成的包络线,连同内部的 U_C 构成了 1 个波形单元。1 个波形单元有 2 种形式,一种是始于正的自然换相点,止于负的自然换相点,如图 1(a)中的阴影所示;另一种始于负的自然换相点,止于正的自然换相

点,如图 1(b)中的阴影所示。可看出,在 1 个导通(工作)的波形单元中,电源的三相是同时供电的。

对一个三相负载,如果让电源持续供电 n 个波形单元,接着断开 m 个波形单元;继而又持续供电 n 个波形单元,然后又断开 m 个波形单元;……如此往复,周而复始。这种供电方式称为 $\frac{n}{(n+m)}$ 分频运行方式($m, n=1, 2, 3, \dots$)。分频是相对工频运行方式而言的。

分频调速实质是以单元波形为基础,使工频电源分时、分割地向电动机供电,实现对电动机转速调节。与文献[4,5]提出的掉电控制方法相比,不仅电动机的冲击电流小,并且能得到同样明显的节电效果。

2 分频调速实现原理

设计的调速装置主电路如图 2 所示。

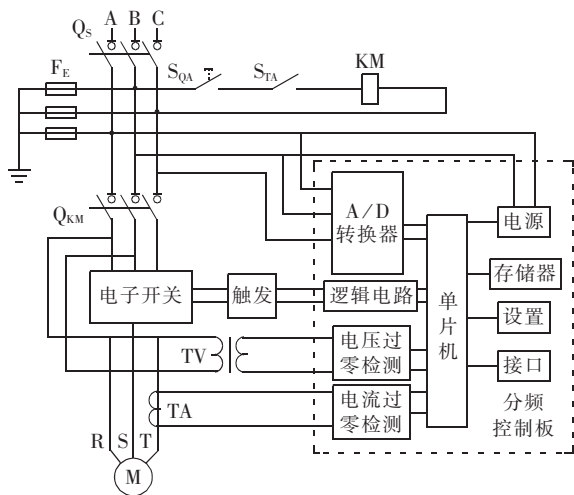


图 2 矩阵式分频调速主电路图

Fig.2 The main circuit of matrix divided-frequency speed regulation

图 2 中的 Q_s 为刀闸开关, S_{KM} 为交流接触器, F_E 为保护避雷器, KM 为启动按钮, S_{TA} 为停止按钮。装置启动后,通过控制板的设置和转速的要求实现对电动机的控制。图 3 为电子开关采用矩阵式的结构,由编号分别为 $T_{RA}, T_{RB}, T_{RC}; T_{SA}, T_{SB}, T_{SC}; T_{TA}, T_{TB}, T_{TC}$ 的 9 只双向晶闸管组成。图 3 电子开关 9 只晶闸管由图 2 装置控制板和触发电路控制,按上述分频调速原理实现对电动机的分时、分割供电。

为了分析方便,首先定义开关函数:

$$S_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{双向晶闸管 } V_{Tjk} \text{ 处于导通状态} \\ 0 & \text{双向晶闸管 } V_{Tjk} \text{ 处于断开状态} \end{cases}$$

式中 $j \in \{R, S, T\}; k \in \{A, B, C\}$ 。

S_{jk} 表明电动机晶闸管 V_{Tjk} 的工作状态。当 $S_{jk}=1$

时, V_{Tjk} 导通, j 绕组便由 k 相电源供电。

在三相交流电源供电,电动机自然换流的过程中,电动机的每个绕组都有可能由 A, B, C 三相中的一相供电,控制开关原理见图 3,该图形象地说明了这一密切联系。据此建立的开关矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} S_{RA} & S_{RB} & S_{RC} \\ S_{SA} & S_{SB} & S_{SC} \\ S_{TA} & S_{TB} & S_{TC} \end{bmatrix}$$

由于电动机分频运行时每个周期都必须经过 3 个运行阶段才能完成 1 次循环(一个完整的换相过程),所以每个不同的阶段都有自己的开关矩阵,即第 1 阶段的 S_1 为

$$S_1 = \begin{bmatrix} S_{RA} & 0 & 0 \\ 0 & S_{SB} & 0 \\ 0 & 0 & S_{TC} \end{bmatrix}$$

第 2 阶段的 S_2 为

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{RC} \\ S_{SA} & 0 & 0 \\ 0 & S_{TB} & 0 \end{bmatrix}$$

第 3 阶段的 S_3 为

$$S_3 = \begin{bmatrix} 0 & S_{RB} & 0 \\ 0 & 0 & S_{SC} \\ S_{TA} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

显然有

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (1)$$

电动机运行时,每一确定的绕组至多只能由一相电源供电,否则将会造成相间短路。于是有

$$\begin{aligned} S_{RA} + S_{RB} + S_{RC} &\leq 1 \\ S_{SA} + S_{SB} + S_{SC} &\leq 1 \\ S_{TA} + S_{TB} + S_{TC} &\leq 1 \end{aligned} \quad (2)$$

或记为

$$\sum S_{jk} \leq 1 \quad (3)$$

设三相电源电压分别是 U_A, U_B, U_C , 电动机端电压分别是 U_R, U_S, U_T 。由图 3 可以看出

$$U_R = S_{RA} U_A + S_{RB} U_B + S_{RC} U_C \quad (4)$$

同理有

$$U_S = S_{SA} U_A + S_{SB} U_B + S_{SC} U_C \quad (5)$$

$$U_T = S_{TA} U_A + S_{TB} U_B + S_{TC} U_C \quad (6)$$

故有

$$\begin{bmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{RA} & S_{RB} & S_{RC} \\ S_{SA} & S_{SB} & S_{SC} \\ S_{TA} & S_{TB} & S_{TC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

简记为

$$U_0 = S U_1 \quad (8)$$

图 4 是以 2/3 分频的输入输出电压波形及导通顺序图为例,简单介绍了分频时的晶闸管导通顺序。在 ωt 从 $0 \sim 6\pi$ 区间内,令晶闸管按第 1 段阴影面积序列导通,然后又全部无上一段时间;接着按第 2 阶段阴影面积的序列导通,向交流异步电动机供电,继而又全部截止一段时间;接着再按第 3 阶

图 3 矩阵式分频调速控制开关原理图

Fig.3 The principle diagram of switching control

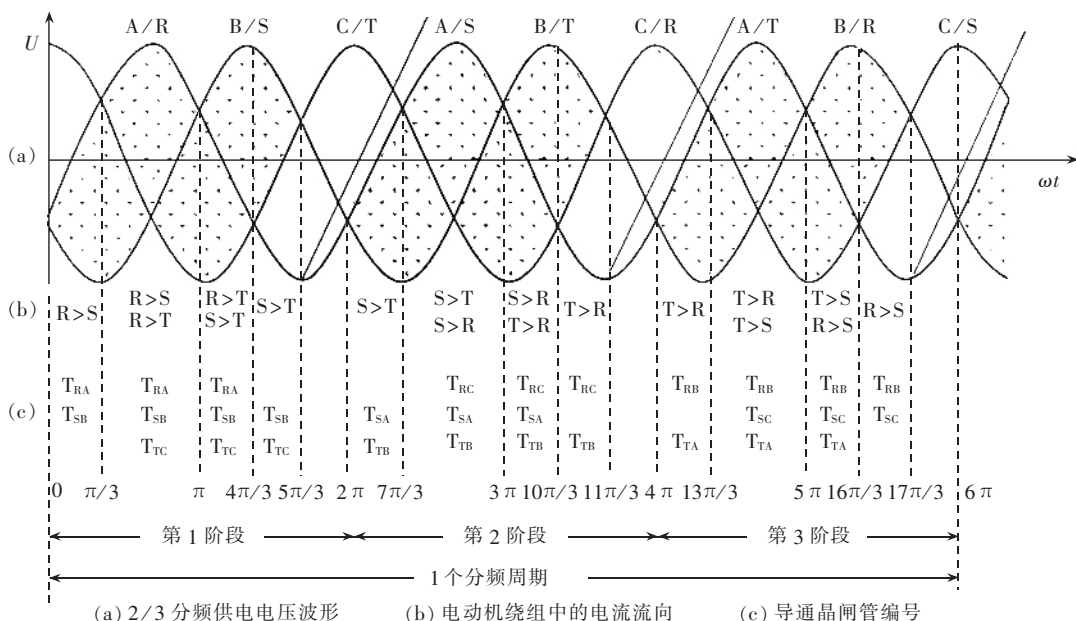


图 4 2/3 分频波形及导通顺序图

Fig.4 The waves and turn-on sequence of 2/3 divided-frequency

段阴影面积的序列导通,向交流异步电动机供电,随后也截止一段时间。然后按第 1 阶段供电……。

3 分频调速实现的关键技术

3.1 两种过零导通方式的综合应用

在图 5 所示的波形图中,在自然换相点 a ,线电压 U_{AB} 为 0,A 相电路中串联的正向晶闸管、B 相电路中串联的反向晶闸管可同时触发导通;在自然换相点 b ,线电压 U_{CA} 为 0,C 相电路中串联的反向晶闸管可以触发导通。可看出,在自然换相点 a, b 处,需采用电压过零触发方式^[6]。在自然换相点 d 处,线电压 U_{AB} 经历半个周期后再次达到 0 值,如果所带的负载是纯阻性的,此时 B 相电路中串联的正向晶闸管可以立即触发导通;但由于电动机是感性负载,线路中的电流并没有达到 0 值,线路中串联的晶闸管尚没有恢复反向阻断能力,即便此时给 B 相电路中串联的正向晶闸管施加触发脉冲,在脉冲宽度不够的情况下,B 相是不能导通的。如果想让 B 相可靠导通,就要增加脉冲宽度(在图 5 中至少从 c 点持续到 d 点)。因此,晶闸管的触发控制是需要认真考虑的问题。

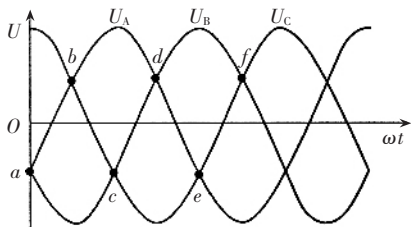


图 5 三相电压波形图

Fig.5 Three-phase voltage waves

触发电路可综合采用电压过零和电流过零两种触发方式。在如图 5 所示的波形电路中,在电动机刚开始运行时的 a, b 自然换相点用电压过零触发方式,在随后的 d, e, f 等自然换相点可采用电流过零触发方式。过零触发电路可采用 MOTOROLA 公司的 MOC3083 双向晶闸管过零触发电芯片实现。

3.2 防误触发措施

电子开关 9 只双向晶闸管可分为 3 组, 分别需要在 3 个不同阶段对每组中的 3 只晶闸管发出它们对应的脉冲, 这是正常的触发状态。但在实际的运行中, 如果控制板失控或存在强电磁干扰, 使同 1 组 3 只晶闸管中的 2 个或 3 个同时触发, 将会因两相晶闸管导通导致短路。因此, 除控制板采取必要的抗干扰措施外, 还必须采取对应的控制方法和控制策略, 可通过数学逻辑电路对输出脉冲信号进行处理。

以开关第 1 组的 3 个脉冲为例, 设从控制单片机发出的脉冲是 P_1, P_2, P_3 , 经处理后送触发板的脉冲是 P'_1, P'_2, P'_3 , 设高电平为 1, 低电平为 0。可给出控制真值表, 如表 1 所示。

表 1 控制脉冲真值表

Tab.1 The truth table for pulse control

单片机发出的脉冲			去触发板的脉冲		
P ₁	P ₂	P ₃	P' ₁	P' ₂	P' ₃
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	0
1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0

根据表1可得触发脉冲表达式:

$$P'_1 = \overline{P_2 + P_3} \times P_1$$

$$P'_2 = \overline{P_3 + P_1} \times P_2$$

$$P'_3 = \overline{P_1 + P_2} \times P_3$$

由表达式可画出逻辑电路图,如图6所示。此逻辑电路图由3个或非门和3个与门组成。

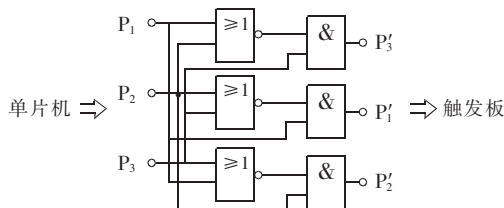


图6 控制逻辑电路图

Fig.6 The controlling logic circuit

用同样的方法,可以给出第2组、第3组晶闸管触发脉冲的逻辑电路。控制逻辑电路可有效防止失控、干扰导致的误触发,保证电子开关及整个装置电路的可靠运行。

4 结论

风机、水泵机械的使用量非常大,这种机械的调速节电问题需要研究。本文从风机、水泵电动机调速要求和控制系统改造成本考虑,给出了一种矩阵式晶闸管变频调速装置的方案,提出了装置实现方法和问题解决思路。从使用的器件上可以看出,本文装置具有结构简单、成本低的优点,对允许有级调速的风机、水泵负载而言,是一种低投入、高回报的选择。但装置控制算法和策略的具体实现仍需要研究。

参考文献:

- [1] 许振茂. 变频调速器在风机中的节能应用[J]. 风机技术, 2003, (2): 44-46.
- XU Zhen-mao. Application of converter speed governor on

fan energy-saving[J]. **Technology for Fans**, 2003, (2): 44-46.

- [2] 吴正人,程友良. 风机主要调速节能技术的比较[J]. 华北电力技术, 2002, (12): 50-52.
- WU Zheng-ren, CHENG You-liang. Comparison of major energy saving technologies of fan velocity control[J]. **North China Electric Power**, 2002, (12): 50-52.
- [3] 岳国良,齐玉锋,张建忠. 高压变频器及其在电厂中的应用[J]. 华北电力技术, 1999, (9): 27-30.
- YUE Guo-liang, QI Yu-feng, ZHANG Jian-zhong. High voltage frequency converter and its application in power plant[J]. **North China Electric Power**, 1999, (9): 27-30.
- [4] 黄超,王敏,王仲鸿. 游梁式抽油机运行状况及节电机理研究[J]. 石油矿场机械, 1999, 28(4): 9-12.
- HUANG Chao, WANG Min, WANG Zhong-hong. Study on operation and power saving of the beam pumping unit[J]. **Oil Field Equipment**, 1999, 28(4): 9-12.
- [5] 朱慧瑜,王敏,王仲鸿. 游梁式抽油机节电问题的仿真研究[J]. 石油矿场机械, 1999, 28(6): 20-23.
- ZHU Hui-yu, WANG Min, WANG Zhong-hong. Study on simulation method for power saving of the beam pumping unit[J]. **Oil Field Equipment**, 1999, 28(6): 20-23.
- [6] 余志勇,李忠义. 晶闸管交流调压器触发电路分析与设计[J]. 电力电子技术, 1998, 22(1): 1-6.
- YU Zhi-yong, LI Zhong-yi. Analysis and design of trigger circuit in thyristor AC regulator[J]. **Power Electronic Technology**, 1998, 22(1): 1-6.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

赵振喜(1975-),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为供配电系统新技术;

刘连光(1954-),男,吉林汪清人,教授,从事电力系统分析与控制等方面的教学和科研工作;

周建博(1970-),男,陕西武功人,讲师,从事电力系统自动化方面的教学工作。

Research on divided-frequency speed regulation based on matrixing thyristor circuit

ZHAO Zhen-xi¹, LIU Lian-guang¹, ZHOU Jian-bo²

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Xi'an Electric Power College, Xi'an 710032, China)

Abstract: Divided-frequency speed regulation is an energy-saving method. The connotative meaning of divided-frequency speed regulation is introduced. Its main circuit and matrix switch principle are presented, in which the nine bidirectional thyristors are divided into three groups. The switch function S and switch matrix S are defined, and the realization principle of divided-frequency circuit is deduced. Two key technologies are focused on. The zero-cross-over triggering of voltage and current at natural commutation point reduce the memory occupation. The logic circuit is used to avoid mis-triggering, which is designed based on a truth table listed according to the pulse characters. Practice shows that it's efficient with low cost for the fan and pump loads with step regulation.

Key words: divided-frequency speed regulation; zero-cross-over triggering; logic circuit; energy-saving equipment