

感应电动机电源切换的 UPS 逆变器控制策略

王璐¹, 周海潇², 罗建¹, 唐治德¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 广东电网公司东莞供电局, 广东 东莞 523001)

摘要: 针对重要负荷无缝供电的要求, 提出了一种利用 UPS 逆变器控制实现的切换策略, 使以感应电动机为代表的重要负荷在电源故障之后能快速平稳地切换到备用电源。通过分析典型动态负荷感应电动机的运行机理, 说明了在失电状态下的残压变换规律和决定冲击大小的因素。对 UPS 中的逆变器通过空间矢量 (SVPWM) 方式进行调制, 并对输出电压相位提出了一种相位分割的方式进行调整, 最终实现在市电与备用电源存在相位差的情况下, 对感应电动机负荷进行电源切换, 有效避免了传统电源切换过程中对电动机的大电流的冲击。通过理论分析和 Simulink 仿真, 最后进行了实验室试验, 证明了策略的正确性和可行性。

关键词: 相位调整; UPS; 空间矢量; 电源切换; Simulink

Control strategy of UPS for the inductor motor

WANG Lu¹, ZHOU Hai-xiao², LUO Jian¹, TANG Zhi-de¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Dongguan 523001, China)

Abstract: This paper proposes a switching scheme by controlling the inverter in the UPS to meet the demand of uninterrupted power supply for important load. It can make the load such as inductor motors get supplied by the stand-by power after power failure quickly and smoothly. The operational mechanism of the inductor motor is analyzed and the variation of the residual voltage and the influence factors of the impact current are explained. The inverter in the UPS is in Space Vector Modulation (SVPWM), which can immediately track the residual voltage to support the motor. It controls the phase of the output voltage of the inverter toward the stand-by power and makes the switching of the power supply smooth. This phase control scheme can make the power switch for the inductor motor succeed avoiding the impact of the surge current when the phase difference exists. The validity and the feasibility are convinced by the theoretical analysis and the simulation by Simulink as well as experiments in the laboratory.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277189/E070503).

Key words: phase modulation; UPS; space vector; source transfer; Simulink

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0049-07

0 引言

随着现代工业技术的迅速发展, 电网中越来越多的重要负荷, 比如大型工矿企业, 对供电可靠性提出了很高的要求, 有的必须不间断地供电^[1]。这些负荷由于电网存在故障等原因, 会面临短时失电的威胁, 造成严重的经济社会损失。

为保障重要负荷的不间断供电, 不间断电源 (Uninterruptible Power Supply, UPS) 相应出现。

现有的 UPS 有后备式、双变换在线式、在线互动式和 Delta 变换式^[2]。对于功率稍大的重要负荷, 维护与使用寿命等方面的问题急需解决。而在线式 UPS 需要一直通过逆变器对负载供电, 对于大功率的负载, 逆变器消耗的电能不能忽视。

对于采用交流直接供电的系统, 主要通过快速投入备用并隔离故障以缩短停电时间。传统自备装置的电源恢复时间一般都在 2 s (考虑与重合闸的配合) 以上^[3], 此时部分电动机已被切除, 剩余未切除的电机, 其电压和转速都有很大下降, 这时切换到另一侧母线, 需要相对较长的时间才能恢复正

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51277189/E070503)

常运行,对一些产品的生产造成不利影响,甚至会造成事故扩大,引起重大损失^[4-5]。因此,快速切换装置得到了广泛使用,它根据切换时刻的不同来实现不同功能。在母线残压与备用电源相位差不超过 30° 时可以采用快速切换功能^[6-7],但一旦切换失败则需等待更长的时间,而此时电动机已经失压,面临电机停运的危险。

因此有必要研制新型无缝供电切换方式,解决电网重要负荷的可靠供电难题。本文应用空间矢量调制的逆变器,通过对其输出电压的相位调节,提出了一种高效的无缝供电方式,使其既能在市电失电的情况下为重要负荷短时供电,又能主动调节输出电压,快速将备用电源切换投入。既降低了UPS的容量,又保护负荷在电源切换中不受过冲。

1 感应电动机残压分析

失电残压的产生是因为电动机定子侧电源断开后,转子回路中产生了瞬后感生电流,抵消了定子电流消失引起的磁通变化以维持磁通不突变。这一电流按转子绕组时间常数衰减,其产生的磁场,相对定子绕组以转子转速旋转,在定子绕组中感生出电动势,即感应电动机的失电残压^[8-9]。

将感应电动机三相参数分别用合成相量表示。已知 u_s 、 i_s 、 ψ_s 分别为定子电压、定子电流、定子磁链; i_r 、 ψ_r 分别为转子电流和转子磁链; i_r' 、 ψ_r' 为归算到定子侧的转子电流和转子磁链; ω_r 为转子电角度,电压方程和磁链方程如下:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r \psi_r' \quad (2)$$

$$\psi_s = L_s i_s + M_m i_r' \quad (3)$$

$$\psi_r' = M_m i_s + L_r i_r' \quad (4)$$

$$\text{断电时: } u_r = R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} = 0 \quad (5)$$

由于电动机断电时磁链不能跃迁,因此可以求得转子电流初始值。断电时刻后转子电流可表示为

$$i_r = I_{r0} e^{-\frac{t-t_0}{T_r}} \quad (6)$$

转换到定子侧,用定子侧复坐标表示为

$$i_r' = i_r e^{j\theta} = I_{r0} e^{-\frac{t-t_0}{T_r}} e^{j\theta} \quad (7)$$

式中: $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ 为转子电路时间常数; t_0 为断电时刻;

$\theta = \omega_r t + \theta_0$ 为转子和定子同相轴线夹角, θ_0 为断电

时刻转子和定子同相轴线夹角, ω_r 为转子电角度。

由于电动机失电后定子电流为零,综合式(1)~式(7)可以得到

$$u_s = \frac{d\psi_s}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{d\psi_s}{dt} = (L_s - \frac{M_m^2}{L_r}) \frac{di_s}{dt} + j\omega_r \frac{M_m^2}{L_r} i_s + (j\omega_r - \frac{1}{T_r}) M_m i_r' \quad (9)$$

因此,定子电压表达式为

$$u_s = M_m I_{r0} e^{-\frac{t-t_0}{T_r}} (j\omega_r - \frac{1}{T_r}) e^{j\theta} \quad (10)$$

由此残压解析式可知,残压幅值是由转子转速和转子电流大小共同决定的,残压频率由转子转速决定^[10]。转速在最初的时间内变化不大,所以频率变化不大,UPS投入时可跟踪负载侧母线电压。对于大型感应电动机,由于其定、转子电阻值较小,时间常数大,并且转动惯量大,转速衰减慢,因此其残压衰减较慢,有的达到3s以上^[11]。

失电时残压是一个从与市电相位、幅值相同的电压逐渐衰减的暂态量。由于负载侧母线上有残压,此时对负载加上电源,残压与电源电压之间会有电压差,如图1所示。如果两个电压之间有相位差,则会在电动机机端出现冲击电压。其中 u_s 为电动机一侧母线残压, u_B 为备用电源电压, Δu 为两者之间的向量差, $\Delta\theta$ 为两者之间的相位差。

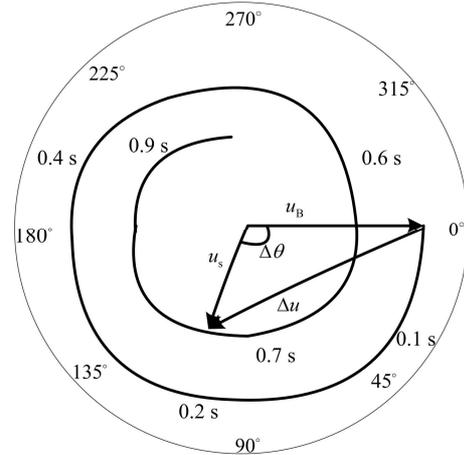


图1 残压衰减相位图

Fig. 1 Residual voltage attenuation phase diagram

随着断电时间的延长,电压差的幅值会随之增大,所带来的冲击电流也会增大。当相位差达到最不利的 180° 时,电压差也达到最大,其幅值为残压与备用电源电压之和。可见,残压与备用电源的相位差的确为电动机的快速切换造成了巨大的威胁。减小备用电源投入时其电压与残压间的相位差,有

助于减小合闸冲击。

2 SVPWM 逆变器

在逆变器的调制方法中, 由于空间矢量调制 (SVPWM) 具有电压利用率高、输出波形谐波含量少、动态响应快等优点^[12-13], 本文逆变器部分采用了 SVPWM 调制。SVPWM 工作原理主要有以下几步: 先判断参考电压空间矢量所在的扇区, 然后分别计算该扇区中晶闸管的导通时间 t_1 、 t_2 。再根据所处扇区确定空间矢量切换点 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} 。根据空间矢量切换点导通晶闸管产生 PWM 波形, 最后通过滤波电路即可得到所要的正弦波。图 2 为 SVPWM 逆变器仿真结构图。

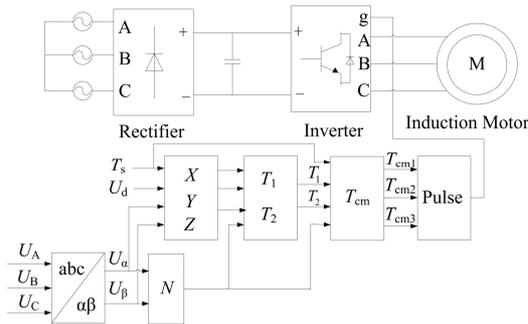


图 2 SVPWM 逆变器 simulink 仿真结构图

Fig. 2 Simulation structure diagram of SVPWM inverter

由于输出电压跟随参考电压, 因此改变逆变器的参考电压相位, 即可改变其输出电压的相位, 使输出电压相位进一步向备用电源电压相位靠拢。

3 UPS 切换策略

3.1 UPS 供电方案

针对以上分析, 本文提出在现有 UPS 为之供电的基础上, 采用相位分割调节方式, 调节 UPS 输出电压相位, 使之逐渐与备用电源靠近, 与此同时, 拉动电动机机端电压与备用电源电压靠近, 再将备用电源平稳投入。系统结构图如图 3 所示。

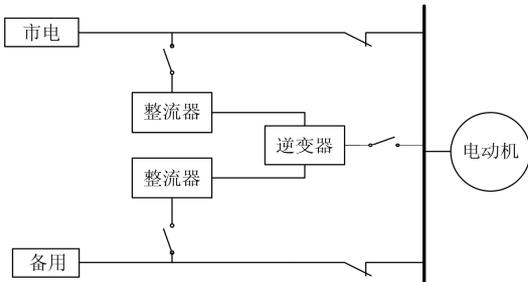


图 3 系统结构图

Fig. 3 System's structure diagram

由图 3 所示, UPS 系统工作方式具体如下:

(1) 当主电源正常时, UPS 逆变器开关关断, 不输出功率。

(2) 当主电源失效后, 负载失电。逆变器快速跟踪负载侧母线电压, 由 UPS 为用电设备提供电源。与此同时, 调节逆变器输出电压, 使之逐渐与备用电源同步, 即可将逆变器同备用电源并联, 之后便可将逆变器退出, 使备用电源直接为负荷供电。

UPS 一方面为负荷提供了暂时的功率, 并输出电动机额定电压, 将母线电压保持在一定值而非迅速衰减。另一方面它调节了逆变器输出与备用电源电压的相位差值, 减小了由备用电源合闸对电动机负荷产生的冲击。

3.2 相位分割调整基本原理

目前, 锁相环已被广泛使用。在锁相环中, 鉴相器就是把两个正弦电压进行比较得到相位差的环节。

$$u = \sin(\omega t + \theta) \quad (11)$$

$$u_0 = \sin(\omega t + \theta_0) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sin(\Delta\theta) &= \sin(\omega t + \theta) \times \cos(\omega t + \theta_0) - \cos(\omega t + \theta) \times \\ &\sin(\omega t + \theta_0) = \sin(\omega t + \theta - \omega t - \theta_0) = \\ &\sin(\theta - \theta_0) \end{aligned} \quad (13)$$

由上式可得两正弦电压相位差 $\Delta\theta$ 的正弦值。

利用鉴相器这一原理, 现提出一种合成中间相位电压的方式, 原理如下:

u_1 为采集到的逆变器当前输出的电压去除幅值信息的信号, 同样, u_2 为采集到的备用电源电压去除幅值信息的信号。以 u_2 为参考信号, 提取 u_1 和 u_2 相对于参考电压的相位差信息:

$$\begin{aligned} \sin(\Delta\theta_{12}) &= \sin(\omega t + \theta_1) \times \cos(\omega t + \theta_2) - \cos(\omega t + \theta_1) \times \\ &\sin(\omega t + \theta_2) = \sin(\omega t + \theta_1 - \omega t - \theta_2) = \\ &\sin(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \cos(\Delta\theta_{12}) &= \cos(\omega t + \theta_1) \times \cos(\omega t + \theta_2) + \sin(\omega t + \theta_1) \times \\ &\sin(\omega t + \theta_2) = \cos(\omega t + \theta_1 - \omega t - \theta_2) = \\ &\cos(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (15)$$

同理可得

$$\sin(\Delta\theta_{22}) = \sin(\theta_2 - \theta_2) = \sin(0) = 0$$

$$\cos(\Delta\theta_{22}) = \cos(\theta_2 - \theta_2) = \cos(0) = 1$$

判断所得相角所在象限之后, 由半角公式可以得到其半角相位的信息为

$$\sin\left(\frac{\Delta\theta_{12}}{2}\right) = \pm \sqrt{\frac{1 - \cos(\Delta\theta_{12})}{2}} \quad (16)$$

$$\cos\left(\frac{\Delta\theta_{12}}{2}\right) = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos(\Delta\theta_{12})}{2}} \quad (17)$$

同理可得 $\sin(\frac{\Delta\theta_{22}}{2})$ 和 $\cos(\frac{\Delta\theta_{22}}{2})$ 。

再次通过三角公式即可获得中间电压的相对参考电压的相位差信息以合成新的电压信号为

$$\sin(\frac{\Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{22}}{2}) = \sin(\Delta\theta_{12}) \times \cos(\Delta\theta_{22}) + \cos(\Delta\theta_{12}) \times \sin(\Delta\theta_{22}) \quad (18)$$

$$\cos(\frac{\Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{22}}{2}) = \cos(\Delta\theta_{12}) \times \cos(\Delta\theta_{22}) - \sin(\Delta\theta_{12}) \times \sin(\Delta\theta_{22}) \quad (19)$$

$$\sin(\omega t + \theta_2 + \frac{\Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{22}}{2}) = \sin(\frac{\Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{22}}{2}) \times \cos(\omega t + \theta_2) + \cos(\frac{\Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{22}}{2}) \times \sin(\omega t + \theta_2) \quad (20)$$

$$\cos(\omega t + \theta_2 + \frac{\Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{22}}{2}) = \cos(\frac{\Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{22}}{2}) \times \cos(\omega t + \theta_2) - \sin(\frac{\Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{22}}{2}) \times \sin(\omega t + \theta_2) \quad (21)$$

每次计算可得到参与计算的两个电压信号的中间相位的新电压信号，将第一次得到中间电压视为第 1 层，计算 3 层的情况如图 4 所示。

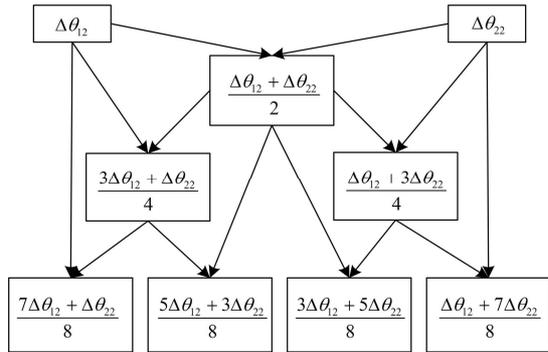


图 4 相位分割流程结构图
Fig. 4 Flowchart of the phase segmentation

由图 4 可知，计算第 n 层时即可获得参与计算的两个电压中间的 2^{n-1} 个电压。因此从第 1 次计算共有 $\sum_{n=1} 2^{n-1}$ 个中间电压，可以变 $\sum_{n=1} 2^{n-1} + 1$ 次，每次的相位差值也变为了最初的 $1/(\sum_{n=1} 2^{n-1} + 1)$ ，从而减小每次变化带来的冲击。由于在调节 UPS 逆变器输出电压的过程中，需要尽快调整，而为了让每次改变参考电压之后电流波动有一定时间恢复，综合设置每次变化时间为半个周波，即 10 ms，则 180° 相位差的情况下，足以变化 8 次。

3.3 Simulink 仿真

在 Matlab 中的 Simulink 平台搭建仿真模型，

运行流程如下：

- (1) 采集电压信号，获得相位差 $\Delta\theta$ 的信息。
- (2) 判断 $\Delta\theta$ 所在的区间，并判断将相位差分割的次数： $\pm[0^\circ, 30^\circ)$ 直接变换； $\pm[30^\circ, 60^\circ)$ 变换 2 次， $\pm[60^\circ, 90^\circ)$ 变换 4 次， $\pm[90^\circ, 180^\circ]$ 变换 8 次。
- (3) 合成中间电压信号，按相位差从大到小的顺序传送参考电压。

图 5 为相差 180° 的两个正弦信号通过相位分割得到的中间信号波形图。

图 5 中，实线表示的即为两相位差为 180° 的正弦信号，经过上述相位分割的方法，即可得到中间相位的信号，如图 5 中虚线所示。

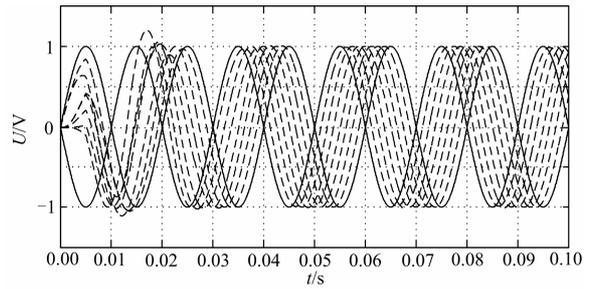


图 5 180° 相位差 8 次分割效果图

Fig. 5 Effect drawing of the phase segmentation when the phase difference is 180°

4 系统仿真

在以上理论分析的基础上，用 Simulink 对系统工作过程进行了仿真验证。仿真选用 Simulink 工具包中自带的鼠笼式感应电动机模型，额定电压有效值为 380 V，额定电流有效值为 7 A，设 0.2 s 时开始变换参考电压，则定子三相电流的仿真情况如下。

当 UPS 逆变器输出与备用电源电压相差为 20° 时，采用直接切换的情况如图 6 所示。

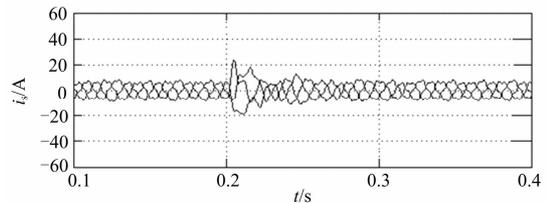


图 6 相位差为 20° 时，定子电流波形图

Fig. 6 Stator current waveform when the phase difference is 20°

可见，当相位差为 20° 时，几乎没有冲击电流，可以直接切换。

当相位差为 30° 时，采用直接切换和相位差分

割调整方式切换的情况如图 7 所示。

图 7 (a) 为直接切换方式, 图 7 (b) 为相位差分割方式 (变换 2 次)。

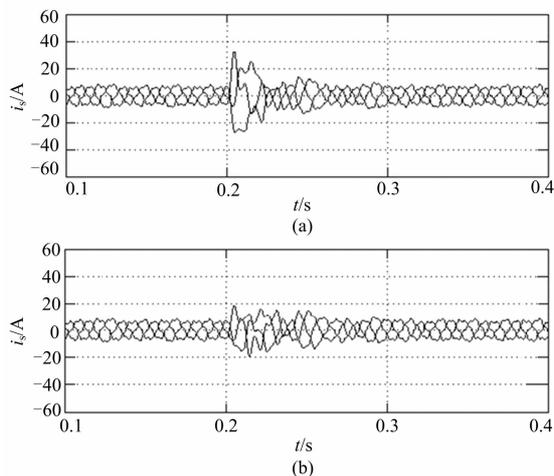


图 7 相位差为 30° 时, 定子电流波形图

Fig. 7 Stator current waveform when the phase difference is 30°

从图 7 可以看到, 相位差较小的时候, 即使是直接切换, 冲击电流幅值小于额定电流幅值的 3 倍, 因此, 也可以直接切换。

当相位差为 60° 时的仿真波形如图 8 所示。

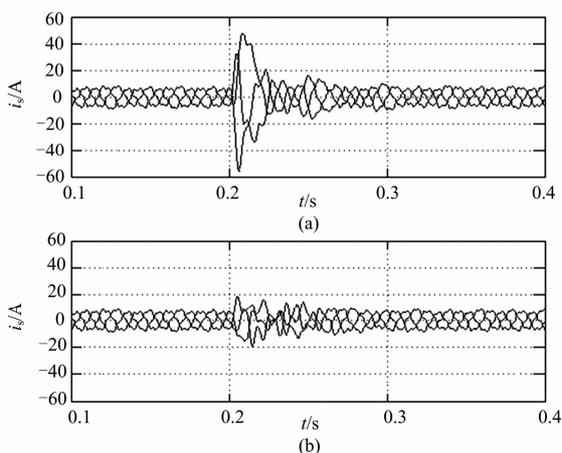


图 8 相位差为 60° 时, 定子电流波形图

Fig. 8 Stator current waveform when the phase difference is 60°

图 8 (a) 为直接切换方式; 图 8 (b) 为相位差分割方式 (变换 4 次)。

由图 8 可知, 相位差为 60° 时, 直接切换时, 冲击电流已达到额定电流幅值的 5 倍以上。而分 4 次变换时的电流冲击远远小于直接切换情况, 其冲击

电流的幅值约为 2 倍额定电流。

当相位差为 90° 时的仿真波形如图 9 所示。

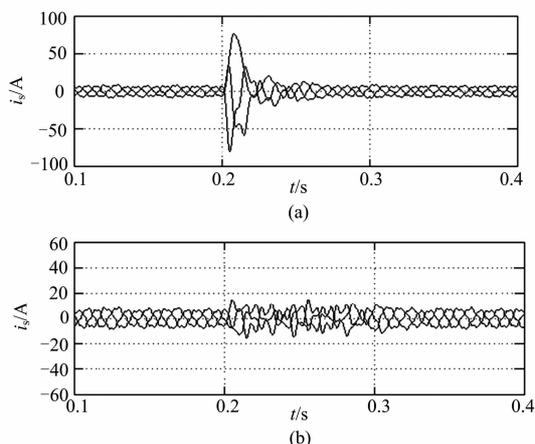


图 9 相位差为 90° 时, 定子电流波形图

Fig. 9 Stator current waveform when the phase difference is 90°

图 9 (a) 为直接切换方式; 图 9 (b) 为相位差分割方式 (变换 4 次)。

从图 9 中可以看到, 变换 4 次的冲击电流幅值约为 2 倍额定电流幅值。

当相位差为最不利的情况, 180° 时的仿真波形如图 10 所示。

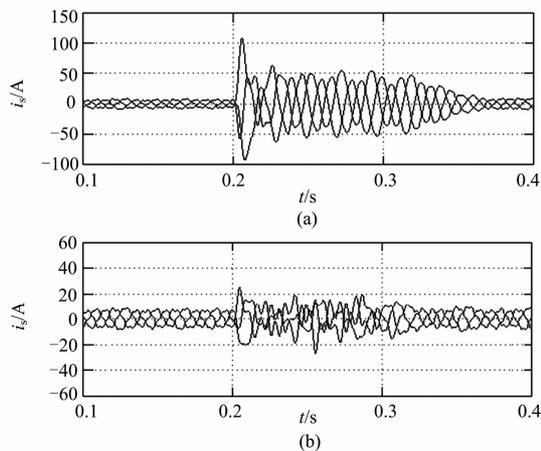


图 10 相位差为 180° 时, 定子电流波形图

Fig. 10 Stator current waveform when the phase difference is 180°

图 10 (a) 为直接切换方式; 图 10 (b) 为相位差分割方式 (变化 8 次)。

由图 10 可以看到, 当相位差为 180° 时, 直接切换的冲击电流约为额定电流幅值的 10 倍。而分成 8 次变化, 每次间隔 10 ms, 所得到的电流冲击较小,

为额定电流幅值的 2 倍,基本能在 100 ms 之内恢复到额定电流,因此选择变化 8 次能较快速平稳切换,与之前的设计策略一致,结果满足要求。

5 实验验证

为验证相位分割控制方式应用在感应电动机电源切换中的可行性,在实验室用与仿真同参数的 4 kW 感应电机,以相位差 180° 和 90° 为例分别进行了试验。所用电动机参数为:额定电压 380 V,额定转速 1430 r/min, $R_s = R_r' = 1.4 \Omega$, $X_s = X_r' = 1.8 \Omega$ 。图 11 为当逆变器输出电源与备用电源采用直接切换和相位分割的控制方式时定子电流对比情况,图 11 (a) 为相位差为 180° 的情况,图 11 (b) 为相位差为 90° 的情况,且左边均为直接切换模式,右边为相位分割模式。

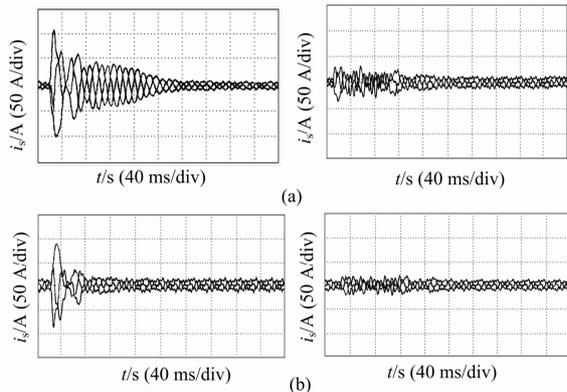


图 11 两种切换方式定子电流实验波形对比

Fig. 11 Comparison of the experimental stator current of the two switching modes

可见,在实验室 4 kW 感应电动机试验的结果与理论分析及仿真结果一致。验证了所提策略的正确性和有效性。

6 结论

从上述的理论分析和仿真试验结果可以得到如下结论:

1) 电动机负载失电之后,负载侧母线残压与备用电源相位差在 30° 以内,从 UPS 切换到备用电源时,可采用直接切换方式时,此时冲击电流最大值小于额定电流幅值的 3 倍,小于一般的起动电流,属于电动机可以承受的范围。

2) 当相位差增大到 30° 以上时,应当在短时间内适当缩小切换时的电压相位差。此时采用相位分割切换方式,各个相位差情况下的冲击电流均小于直接切换方式,并能基本保持在额定电流的 2 倍以内。有效降低了由于较大相位差时,为带有残压的

电动机负载切换备用电源所带来的冲击电流,减小了电源故障切断后为其切换备用电源时由于冲击过大带来合闸失败的危险。

随着电网容量的增大,直接起动方式的适用范围将日益扩大。而直接起动时,一般起动电流为其额定电流的 5~7 倍^[14]。本文所采取的策略是在市电断开,UPS 接入系统为负载提供所需电压,并调整 UPS 逆变器输出电压的相位,逐步减小其与备用电源电压的相位差,最后再将备用电源投入为负载供电。该策略实现了动态负荷的电源切换,满足电动机快速切换在 100 ms 之内的要求,保证断电时间为 0,远远小于电动机失电时间 10 ms 的要求,能够实现为电动机负荷提供无缝无冲击的供电。

参考文献

- [1] 史红艳,陈强,张正涛.快速切换技术在企业供电系统中应用的重要性[J].冶金动力,2011(1):11-12,21.
SHI Hong-yan, CHEN Qiang, ZHANG Zheng-tao. Importance of application of fast switching technology in power supply system of enterprise[J]. Metallurgical Power, 2011(1): 11-12, 21.
- [2] 石磊.UPS 电源技术及发展[J].电气开关,2009(1):8-10,12.
SHI Lei. Development of UPS technology[J]. Electric Switchgear, 2009(1): 8-10, 12.
- [3] 梁振锋,索南加乐,宋国兵,等.输电线路自适应重合闸研究综述[J].电力系统保护与控制,2013,41(6):140-145.
LIANG Zhen-feng, SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 140-145.
- [4] 林舜江,李欣然,刘杨华,等.考虑负荷动态模型的暂态电压稳定快速判断方法[J].中国电机工程学报,2009,29(4):14-20.
LIN Shun-jiang, LI Xin-ran, LIU Yang-hua, et al. Method for transient voltage stability quick judgment considering load dynamic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 14-20.
- [5] 井艳清,李兴源,郭晓鸣,等.考虑感应电动机负荷模型的暂态电压稳定快速判据[J].电力系统自动化,2011,35(5):10-14.
JING Yan-qing, LI Xing-yuan, GUO Xiao-ming, et al. A quick criterion for transient voltage stability considering induction motor load models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 10-14.

- [6] 冯小兰, 李杰, 苗世华, 等. 新型电源快速切换装置在工业企业变电站的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 139-142.
FENG Xiao-lan, LI Jie, MIAO Shi-hua, et al. Application of high-speed bus transfer device in industrial substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 139-142.
- [7] 苗世华, 李杰, 宗洪良. 工业企业电源快速切换装置在低压母线的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 76-79.
MIAO Shi-hua, LI Jie, ZONG Hong-liang. Application of industrial enterprises power quick-switching device in the low-voltage bus[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 76-79.
- [8] 高吉增, 杨玉磊, 崔学深. 感应电动机失电残压的研究及其对重合过程的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 45-53.
GAO Ji-zeng, YANG Yu-lei, CUI Xue-shen. The research of the residual voltage of induction motor after dumping and its influence during restoration[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 45-53.
- [9] 汤晓燕. 三相感应电动机瞬间断电重新投入电网时的瞬态[J]. 电机与控制, 2011, 5(2): 98-102.
TANG Xiao-yan. Reclosing transient of three-phase induction motor[J]. Electric Machines and Control, 2011, 5(2): 98-102.
- [10] ZENGINOBUZ G, ÇADIRC I, ERMIS M, et al. Soft starting of large induction motors at constant current with minimized starting torque pulsations[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(5): 1334-1347.
- [11] ADDYAN M Y. Asynchronous motor residual voltage[C] // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1990.
- [12] 刘家军, 姚李孝, 吴天森, 等. PSCAD/EMTDC 中 SVPWM 算法的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 120-125.
LIU Jia-jun, YAO Li-xiao, WU Tian-sen, et al. Implementation of SVPWM algorithm in PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 120-125.
- [13] 常伟, 史丽萍, 王思捷, 等. 空间矢量调制技术在 6 kV 级联静止同步补偿器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 95-99.
CHANG Wei, SHI Li-ping, WANG Si-jie, et al. Application of space vector modulation in 6 kV cascade STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 95-99.
- [14] 赵兵, 汤涌. 感应电动机负荷的动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 71-77.
ZHAO Bing, TANG Yong. Dynamic characteristics analysis of induction motor loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 71-77.

收稿日期: 2014-03-14; 修回日期: 2014-04-29

作者简介:

王璐(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: wlucqu@163.com

周海潇(1978-), 男, 主要从事配电网运行维护工作;

罗建(1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统保护与控制的研究。