

电网电压三相不平衡时 CVUF 相角因素对异步电机运行性能影响

刘晓芳¹, 张元星¹, 赵海森¹, 王翔宇¹, 韩志¹, 王鹤²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 电网电压不平衡会对异步电动机的运行造成不良影响, 因此研究三相电网电压不平衡时复数电压不平衡度(CVUF)的相角因素对异步电动机运行性能的影响。首先分析了三相绕组电压幅值、相位和 CVUF 间的关系, 基于此, 以 1 台 5.5 kW Y132S-4 异步电动机为例, 在正序电压 380 V、CVUF 幅值恒定以及 75% 负载条件下, 分析了 CVUF 相角因素对异步电机的定子电流、损耗、转矩性能的影响。结果表明: 异步电机定子三相电流均随 CVUF 相角呈正弦规律变化, 为避免带载能力下降过多及绕组过热, 异步电机应避免运行在定子电流最大值处; CVUF 相角对各项损耗、起动性能及稳态转矩脉动分量影响较小。最后计算了不同电压平衡条件下的异步电机三相定子电流和内部各项损耗, 结果与实测结果基本一致, 证明了理论分析的正确性。

关键词: 电压不平衡; 异步电机; 复数电压不平衡度; 定子; 转子; 三相电流; 损耗; 转矩特性

中图分类号: TM 301.4

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.008

0 引言

电压不平衡是电力系统中一种普遍的电能质量偏差现象, 包含幅值与相角不平衡因素, 且主要由电网中三相负荷分布不均造成。异步电机运行在此状态下会产生损耗增加、温升过高、寿命缩短及输出转矩减小等不良影响^[1-3]。为了探索电压不平衡条件下异步电机安全运行及节能控制策略, 有必要针对电压不平衡时相角因素对异步电机定子三相电流、各项损耗及转矩性能的影响进行研究。

已有大量文献对三相电压不平衡对异步电机运行性能及损耗的影响开展了相关研究。文献[4]指出复数电压不平衡度 CVUF (Complex Voltage Unbalance Factor) 同时包含幅值和相角不平衡因素, 分析了 CVUF 相角对异步电机运行性能的影响, 最终提出在分析异步电机不平衡运行问题时必须考虑 CVUF 相角对其的影响; 文献[5]建立了三相感应电动机瞬态模型, 使用四阶龙格库塔方法计算了不同 CVUF 时感应电动机的起动过程, 研究了 CVUF 与最大转矩、起动时间、稳态三相电流不平衡因数、转速及其波动、转矩波动的关系; 文献[6]指出美国电气制造商协会(NEMA)与国际电工委员会(IEC)对电压不平衡度(VUF)的定义均不是最精确的, 基于这些定义对电机运行性能的分析也是不准确的, 因此有必要制定一个更精确的 VUF 定义; 文献[7]对

电压不平衡条件下异步电机的损耗、温升、噪声、振动、转矩脉动、转差率、轴电压、轴电流和加速转矩进行了分析, 并指出电压不平衡导致转子损耗增加, 且定子电流不平衡会引起定子各相绕组温度分布不均, 同时造成加速转矩减小及 2 倍频的转矩脉动; 文献[8]使用对称分量法及 MATLAB 仿真得到如下结论: 综合 IEC 中 VUF 定义与电压不平衡情况可以精确地评估电压不平衡对异步电机总铜耗、输入功率、功率因数及总输出转矩的影响程度, 但同时也要考虑 CVUF 相角对三相绕组最大电流及降额因数的影响, 并定义了一种区分电压不平衡状况的过欠系数, 它有助于对电压不平衡条件下异步电机的运行性能进行更为准确的评估。综上, 已有研究在参考的 VUF 评估标准上存在一定分歧^[6], 或并没有考虑电机实际运行时三相绕组电压矢量和为 0^[9], 或没有同时考虑 VUF 与正序电压(或平均电压)^[5], 且大部分文献中所采用的传统磁路分析方法与等值电路理论由于无法计及饱和及谐波等因素而存在较大误差。

针对以上问题, 本文利用对称分量法计算并分别表示出电机绕组三相电压幅值、两相电压相位与 CVUF 幅值及相角的关系, 并针对一台 5.5 kW Y132S-4 异步电机, 建立了基于时步有限元的损耗计算模型, 分析了 CVUF 相角对定子三相电流、各项损耗及转矩性能的影响。需要说明的是, 由于电压不平衡情况较为复杂, 包括 CVUF 幅值 k_v (负序电压和正序电压幅值之比)、CVUF 相角 θ_v 、正序电压及负载率 4 个影响因素, 且经试验测得上述电机在 $k_v=0.05$ 及 75% 负载下运行时最大单相电流已超过额定电流, 故文中仅针对 75% 负载、 $k_v \leq 0.05$ ^[10] 及正序电压为 380 V

收稿日期: 2013-10-09; 修回日期: 2014-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307050); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS24)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307050) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(12MS24)

的情况开展研究。

1 CVUF 定义及三相绕组电压幅值、相位与 CVUF 间的关系

1.1 CVUF 定义

国内外通常采用以下 VUF 计算方法,即线电压不平衡度(LVUF)、相电压不平衡度(PVUF)、VUF 和 CVUF。文中采用 IEC 精确定义^[11],如式(1)所示。

$$CVUF = \frac{U_N}{U_p} = k_v \angle \theta_v \quad (1)$$

其中,负序电压 $U_N = \frac{1}{3}(U_{ab} + a^2 U_{bc} + a U_{ca})$,正序电压

$$U_p = \frac{1}{3}(U_{ab} + a U_{bc} + a^2 U_{ca}), \text{算子 } a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ};$$

U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 为三相绕组电压; k_v 、 θ_v 分别为 CVUF 幅值和相角,不难发现 θ_v 实际上为 U_{ab} 的正、负序分量间夹角,另外两相电压的正、负序分量间夹角分别与此相差 120° 、 240° 。

1.2 三相绕组电压幅值、相位与 CVUF 间的关系

1.2.1 三相绕组电压幅值与 CVUF 间的关系

在给定 CVUF 及正序电压 U_p 的情况下,可以根据对称分量法以及基尔霍夫电压定律反求出该电压不平衡状态时的三相绕组电压。例如,在 $k_v = 0.05$ 、 $-180^\circ \leq \theta_v \leq 180^\circ$ 、 $350 \text{ V} \leq |U_p| \leq 410 \text{ V}$ 条件下,三相绕组电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 幅值的三维关系如图 1 所示,其中三维图形表面上的经线、纬线分别表示 CVUF 相角 θ_v 和正序电压幅值 $|U_p|$,图中已将 $|U_p|$ 为 350 V、380 V、410 V 的 3 条纬线标出。从图中可以看出: $k_v = 0.05$ 时所对应的三相不平衡电压组合情况有很多种,因此使用其中某一组电压去衡量该 CVUF 幅值下电机的运行性能会引起较大的误差。

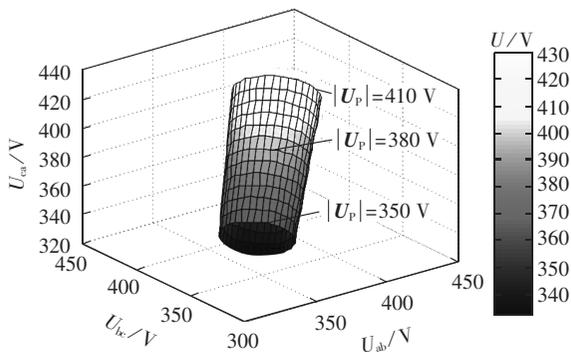


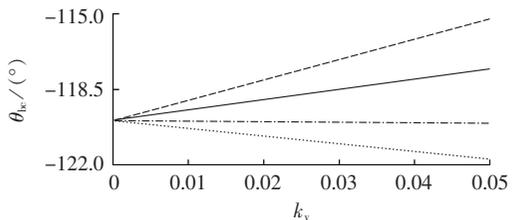
图 1 $k_v = 0.05$ 且 $-180^\circ \leq \theta_v \leq 180^\circ$ 时三相绕组电压幅值

Fig.1 Three-phase winding voltage amplitudes when $k_v = 0.05$ and $-180^\circ \leq \theta_v \leq 180^\circ$

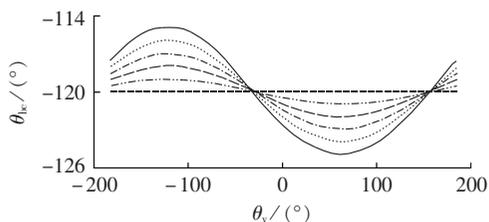
1.2.2 三相绕组电压相位与 CVUF 间的关系

假设 U_{ab} 相位始终为参考相位,且值为 0° ,可将电压不平衡时 U_{bc} 相位 θ_{bc} 与 k_v 、 θ_v 关系表示成图 2 所示。图 2(a)为 θ_v 相同时 θ_{bc} 随 k_v 的变化规律,仅

以 4 组 θ_v 进行说明,可见: θ_{bc} 随 k_v 呈线性规律变化,且 $\theta_v = -100^\circ$ 时, θ_{bc} 随 k_v 的变化率较大;而在 $\theta_v = -30^\circ$ 时, θ_{bc} 随 k_v 的变化率近似为 0。图 2(b)为 k_v 相同时 θ_{bc} 随 θ_v 的变化规律,可以看出: θ_{bc} 随 θ_v 呈正弦规律变化,且变化幅度随 k_v 的增大而增大。同理可得 U_{ca} 相位 θ_{ca} 随 k_v 、 θ_v 的变化规律。此外,在保持 k_v 相同前提下,对正序电压在 350~410 V 时的两相电压相位进行计算时,发现不同正序电压下每一 θ_v 所对应的两相电压相位均相等。因此可认为:任何给定 k_v 条件下,所求两相电压相位与正序电压大小均无关。



(a) θ_v 相同



(b) k_v 相同

图 2 恒定 $\theta_v(k_v)$ 下 θ_{bc} 随 $k_v(\theta_v)$ 变化规律

Fig.2 Relationship between θ_{bc} and $k_v(\theta_v)$ when $\theta_v(k_v)$ is constant

综上,结合图 1 与图 2,可得任意 k_v 、 θ_v 及正序电压条件下的三相绕组电压幅值与相位,如 CVUF = $0.05 \angle 50^\circ$ 且正序电压为 380 V 时, $U_{ab} = 392.5 \angle 0^\circ \text{ V}$, $U_{bc} = 386.9 \angle -124.8^\circ \text{ V}$, $U_{ca} = 361.3 \angle -241.6^\circ \text{ V}$,且每个 CVUF 对应多种三相不平衡电压组合,按照正序电压大小可将其分为欠电压不平衡与过电压不平衡。

2 时步有限元法

2.1 时步有限元模型建立

本文以一台 5.5 kW Y132S-4 异步电机为例,其基本参数如表 1 所示,绕组为 Δ 接法。表中, U_N 、 P_N 、 I_N 、 n_N 分别为电机额定电压、额定功率、额定电流和额定转速; p 为电机极对数。基于表 1 参数,建立了如图 3 所示的有限元模型,其中左半部分为电机定转子基本结构,右半部分为有限元剖分网格图。

2.2 时步有限元损耗计算方法

与传统计算方法相比,本文采用的时步有限元损耗计算模型可以在计及饱和及谐波等因素前提下,对电机内部任意单元的磁通密度和电流密度进

表 1 5.5 kW Y132S-4 电机参数及尺寸

Tab.1 Parameters and size of 5.5 kW Y132S-4 motor

参数	数值	参数	数值
U_N	380 V	定子外径	210 mm
P_N	5.5 kW	定子内径	136 mm
I_N	11.64 A	铁芯长度	115 mm
n_N	1440 r/min	气隙	0.4 mm
p	2		

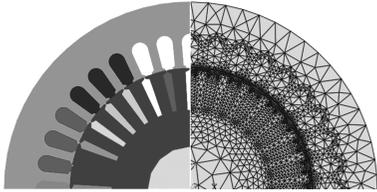


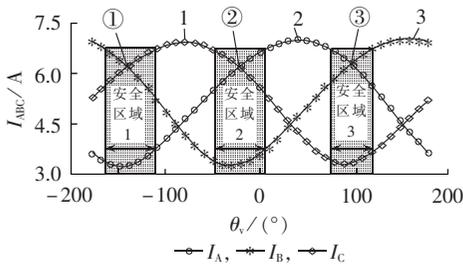
图 3 5.5 kW 异步电机有限元结构及剖分图

Fig.3 FEM structure and subdivisions of 5.5 kW motor

行计算,在损耗计算方面具有明显优势,其中定子铜耗、转子铜耗以及铁耗均采用文献[13]中的计算方法;且由于本文所分析电机为斜槽转子,电机内部磁场沿轴向分布不同,故利用文献[14]中的多截面场-路耦合时步有限元法进行计算。

3 CVUF 相角对定子电流的影响

对异步电机定子绕组施加 $k_v = 0.05$ 、 $-180^\circ \leq \theta_v \leq 180^\circ$ 条件下的三相不平衡电压,经时步有限元计算得到每组电压下定子三相电流随 θ_v 的变化规律如图 4 所示。从图 4 中可以看出:电压不平衡时,三相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 有效值随 θ_v 均呈正弦变化规律,且三者出现最大值时的 θ_v 互差 120° 。经计算验证, k_v 分别取值 0.01、0.02、0.03、0.04 条件下,三相电流变化规律与此相同,故不再赘述。



①-最佳运行点 1,②-最佳运行点 2,③-最佳运行点 3
1-最坏运行点 1,2-最坏运行点 2,3-最坏运行点 3

图 4 $k_v=0.05$ 且 75% 负载时定子三相电流与 θ_v 的关系曲线

Fig.4 Curves of three-phase stator current vs. θ_v when k_v is 0.05 and load is 75%

受温升限制,电机长期运行时绕组电流应不超过额定电流,而电压不平衡会引起绕组电流出现不平衡,为了确保不平衡电压下电机安全稳定运行,就需要限制单相最大电流不超过额定电流,据此可确定电机安全运行区域如图 4 中所示。图中,当某相定子电流出现最大值时的 θ_v 为电机最坏运行点,任意

两相定子电流相同且不超过额定电流时的 θ_v 为电机最佳运行点,可以看出在 $-180^\circ \leq \theta_v \leq 180^\circ$ 范围内,有 3 个安全运行区域且每个安全区域内存在 1 个最佳运行点,而在安全区域外有 3 个最坏运行点。图 4 中所示 $k_v=0.05$ 且电机带 75% 负载时,最坏与最佳运行点时的 θ_v 分别为: -80° 、 40° 、 160° 与 -140° 、 -20° 、 100° 。

需特殊说明的是,本文仅针对系统中允许的较低 CVUF 幅值进行研究,为处理方便,对电机正、负序等效电路作简化处理,由电机学理论分析可知:电机最坏、最佳运行点时的 θ_v 分别由式(2)、(3)决定。

$$\theta_v = \text{angle}(Z_N) - \text{angle}(Z_P) + \frac{2n\pi}{3} \quad n = -1, 0, 1 \quad (2)$$

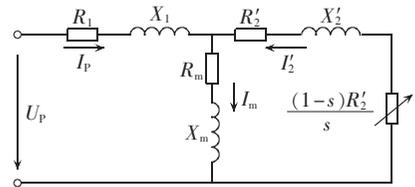
$$\theta_v = \text{angle}(Z_N) - \text{angle}(Z_P) + \frac{(2n-1)\pi}{3} \quad n = -1, 0, 1 \quad (3)$$

其中, Z_P 、 Z_N 分别为从异步电机定子绕组端看进去的正、负序等效阻抗; angle 为阻抗角的运算命令,如 $Z=R+jX$,则 $\text{angle}(Z)=\arctan(X/R)$ 。 Z_P 、 Z_N 可分别由图 5(a)、(b)所示的正、负序等效电路[15]计算得到,结果分别如式(4)、(5)所示。

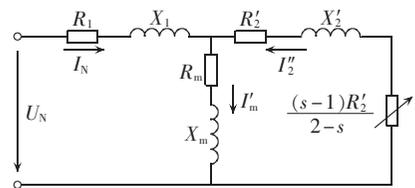
$$Z_P = (R_1 + jX_1) + \frac{(R_m + jX_m)(R_2'/s + jX_2')}{(R_m + jX_m) + (R_2'/s + jX_2')} \quad (4)$$

$$Z_N = (R_1 + jX_1) + \frac{(R_m + jX_m)[R_2'/(2-s) + jX_2']}{(R_m + jX_m) + [R_2'/(2-s) + jX_2']} \quad (5)$$

其中, R_1 、 X_1 、 R_2' 、 X_2' 、 R_m 、 X_m 、 s 分别为定子电阻、定子电抗、转子电阻、转子电抗、激磁电阻、激磁电抗和转差率。



(a) 正序等效电路



(b) 负序等效电路

图 5 异步电机正、负序等效电路

Fig.5 Positive and negative sequence equivalent circuits of asynchronous motor

经空载与堵转试验可知,文中所分析 5.5kW 异步电机的正、负序等效阻抗 Z_P 、 Z_N 分别为 $(47.2+j30.5)\Omega$ 、 $(3.5+j11.9)\Omega$,因此 $\text{angle}(Z_N) - \text{angle}(Z_P) = 40.5^\circ$,为图 4 中的最坏运行点,故计算结果与理论分析是一致的。该最坏运行状态时 θ_v 的含义为:此时 A 相的正、负序电流分量接近同相致该相电流达到最大值。

综上,电压不平衡时,应根据电机参数求得最佳、最坏运行点,尽量使其工作在最佳运行点,以在该 CVUF 幅值下电机带载能力下降程度最少。另外,在设计电机负序电流保护电路时,若只考虑 k_v 影响时,则可能会由于电机运行在最坏运行点且单相最大电流已超额定电流,保护电路未发出动作命令而导致电机过热运行。

进一步对电机在 k_v 取 0.01、0.02、0.03、0.04 且正序电压 380 V 条件下的三相不平衡电压进行 75% 负载计算,得到其三相电流随 θ_v 的变化关系,最终绘出 I_{\max}/I_N 与 k_v 、 θ_v 的关系曲面如图 6 所示。其中, I_{\max} 为每一 θ_v 对应的最大相电流, I_N 为额定相电流。由图 6 可知:定子最大相电流随 k_v 的减小而减小,且在 $k_v=0.04$ 时最坏运行点所对应的最大相电流已达到额定电流。因此,对于文中分析的 5.5 kW 异步电机在该状况下运行时,其 CVUF 幅值应不超过 0.04。

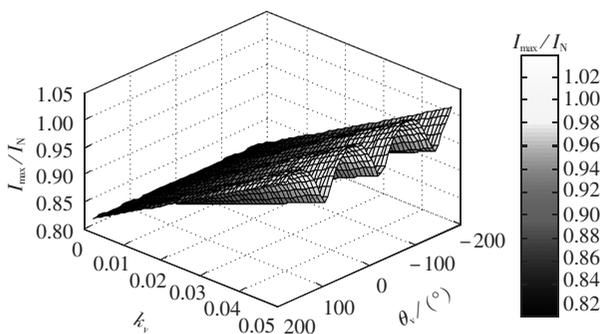


图 6 I_{\max}/I_N 随 k_v 、 θ_v 的变化关系

Fig.6 I_{\max}/I_N varying along with k_v and θ_v

4 CVUF 相角对损耗的影响

4.1 各项损耗变化规律

利用时步有限元法也可计算得到异步电机内部各项损耗,例如,电机带 75% 负载, $k_v=0.05$ 且正序电压为 380 V 时,定子铜耗 p_{Cu1} 、转子铜耗 p_{Cu2} 、铁耗及附加损耗 p_{Fe} 、总损耗 p_{Σ} 随 θ_v 的变化规律如图 7 所示。从图 7 可知:定子铜耗变化相对较大,但也低

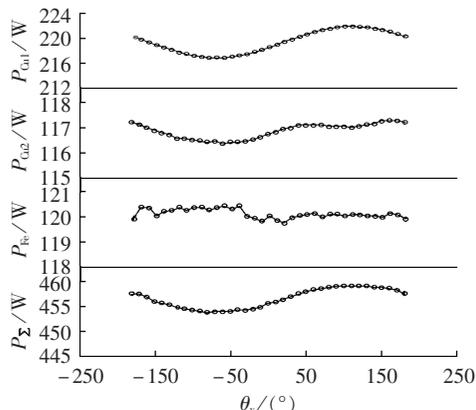


图 7 $k_v=0.05$ 时各项损耗及总损耗随 θ_v 变化关系曲线

Fig.7 Curves of losses vs. θ_v when k_v is 0.05

于 5 W,其最大值、最小值对应的 θ_v 分别近似对应图 4 中的最佳运行点 100° 与最坏运行点 -80° ;此外,对 k_v 取 0.01、0.02、0.03、0.04 时的损耗也进行计算,发现定子铜耗随 θ_v 的变化幅度随 k_v 增加而增加,但在相同 k_v 条件下,定子铜耗随 θ_v 的变化规律与图 7 类似;转子铜耗、铁耗变化较小,为 1 W 左右。上述变化仅占电机总损耗的 1.1%。

4.2 各项损耗变化原因分析

针对以上各项损耗变化规律进行分析可知,异步电机在 $k_v=0.05$ 、正序电压 380 V 且带 75% 负载时具有以下特点。

a. 从图 7 中可以看到定子铜耗最大与最小值对应的 θ_v 分别为 110° 、 -70° ,且两者相差 5 W 左右,对这 2 种情况下所对应的定子三相电流进行傅里叶分解可得其基波及各次谐波幅值大小,其对比结果如表 2 所示,表中 $I_{av}=(I_A+I_B+I_C)/3$, $I_{eq}=\sqrt{(I_A^2+I_B^2+I_C^2)/3}$, I_A 、 I_B 、 I_C 及 I_{av} 分别为三相不平衡电流及其平均值的幅值, I_{eq} 为三相不平衡电流的等效有效值。由表中数据可知,2 种情况下三相不平衡电流均不相等,但 3 次谐波占基波的比重及 I_{eq} 均接近相等,而定子铜耗与定子三相电流有效值的平方和近似成正比,所以定子铜耗变化不大。同样可对 θ_v 取其他值时的定子三相电流进行对比分析,结果均与此相同。

表 2 θ_v 为 -70° 、 110° 时定子三相电流的傅里叶分解结果

Tab.2 Fourier transformation results of three-phase stator currents when $\theta_v=-70^\circ$ and 110°

$\theta_v/(^\circ)$	谐波次数	I_A/A	I_B/A	I_C/A	I_{av}/A	I_{eq}/A
-70	基波	6.915	5.455	9.736	7.369	5.395
	3 次谐波	0.632	0.525	0.892	0.683	
110	基波	8.375	9.177	4.841	7.464	5.479
	3 次谐波	0.708	0.823	0.561	0.697	

b. 转子铜耗主要与转差率成正比,从图 7 中可知转子铜耗变化在 1 W 左右,计算结果显示不同 θ_v 时转速接近相等,例如, θ_v 为 -80° 、 100° 时的转速差别最大,分别为 1458.4、1456.7 r/min;从转子电流角度分析时,对转子槽顶某位置在 θ_v 为 -70° 、 110° 时的电流密度波形及其傅里叶分析进行对比,结果如图 8 所示,其中 J 表示电流密度。由图 8 可知 2 种情况下转子槽 2、6、18 等偶次谐波电流密度变化较小,故转子铜耗基本不变。

c. 忽略定子压降的前提下,可认为铁耗与定子绕组端电压的平方近似成正比,电压不平衡时则主要由正序电压或三相电压平均值决定。从图 7 可见铁耗变化在 0.8 W 内,且无明显变化规律。从铁芯磁通密度角度分析,对定、转子铁芯齿顶某位置在 θ_v 为 -70° 、 110° 时的磁通密度波形及其傅里叶分析进行

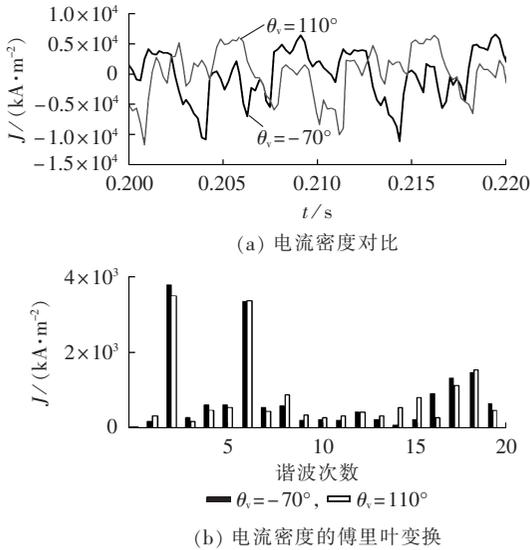


图 8 转子槽顶典型位置处电流密度波形及其傅里叶变换结果对比

Fig.8 Comparison of current density waveforms and corresponding Fourier transformation results when rotor slot is at typical position

对比,结果分别如图 9、10 所示,图中, B_r 、 B_t 分别为径向磁通密度与切向磁通密度。由图 9 可以看出定子铁芯 B_r 与 B_t 基波磁通密度幅值相差很小,因此定子铁耗变化不大;由图 10 可以看出转子铁芯 B_r 与 B_t 的 2、6、12、18 等偶次谐波磁通密度变化也较小,因此转子铁耗变化不大,两者综合导致总铁耗基本不变。

综上所述:电压不平衡时,在 CVUF 幅值、正序电压及负载相同的前提下,定子三相不平衡电流有效值、转子电流密度各次谐波含量及定转子铁芯磁通密度各次谐波含量总体变化均较小,因此各项损

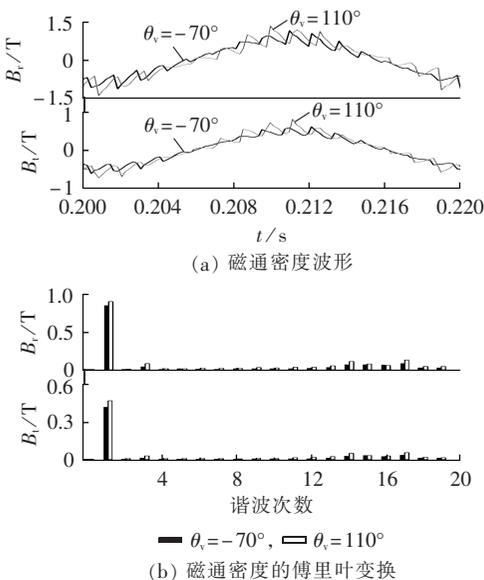


图 9 定子铁芯典型位置处磁通密度波形及其傅里叶变换结果对比

Fig.9 Comparison of flux density waveforms and corresponding Fourier transformation results when stator core is at typical position

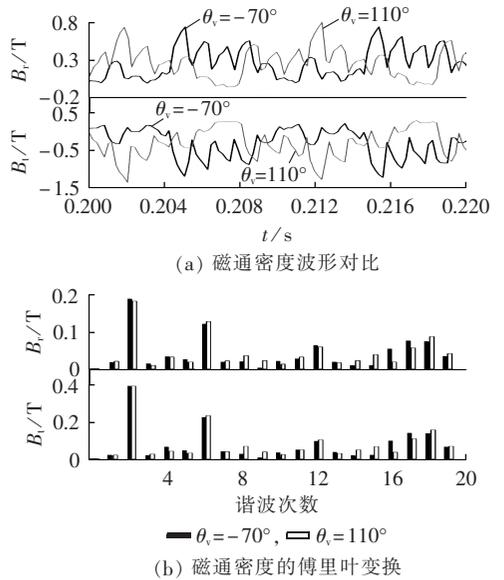


图 10 转子铁芯典型位置处磁通密度波形及其傅里叶变换结果对比

Fig.10 Comparison of flux density waveforms and corresponding Fourier transformation results when rotor core is at typical position

耗随 θ_v 变化不大,因此在工程实际中, θ_v 对各项损耗影响可忽略。此外,经计算验证,保持负载及正序电压相同条件下, k_v 为 0.01、0.02、0.03、0.04 与 k_v 为 0.05 时的各项损耗随 θ_v 的变化规律均相同,且各项损耗变化量随 k_v 的减小而减小。

5 CVUF 相角对转矩性能的影响

电压不平衡时,负序磁场将导致异步电机输出转矩减小,为分析 CVUF 相角对电机转矩性能的影响,在 $k_v=0.05$ 且正序电压 380 V 前提下,本文选取 θ_v 分别为 90° 、 0° 、 -90° 、 -180° 4 种条件下的三相不平衡电压,并利用时步有限元法对电机的满载起动过程进行了计算,最终得到这 4 种情况下的转矩-转速特性曲线及稳态转矩波形,并将其与电压平衡时进行对比,结果分别如图 11(a)、(b)所示。

由图 11(a)可知:电压不平衡时,异步电机的最大、最小转矩均有不同程度的减小,如 θ_v 为 0° 、 -90° 、 -180° 、 90° 时,最大转矩分别为 101.0、101.3、101.1、101.1 N·m,相对平衡时均减小了约 3.8%;最小转矩分别为 72.5、71.4、71.9、72.8 N·m,相对于平衡时分别减小了 1.4%、3.0%、2.3%、1.1%;但是 4 种不平衡条件下的最大、最小转矩差别较小,最大转矩接近相等,且最小转矩差值保持在 1.9% 以内。另外,图 11(a)中转矩-转速特性曲线在电机起动初始阶段有一定的波动,这主要是由电机内部 5、7 次谐波磁场综合引起的。综上所述,可认为 CVUF 幅值及正序电压相同条件下,CVUF 相角对异步电机的最大、最小转矩影响较小。

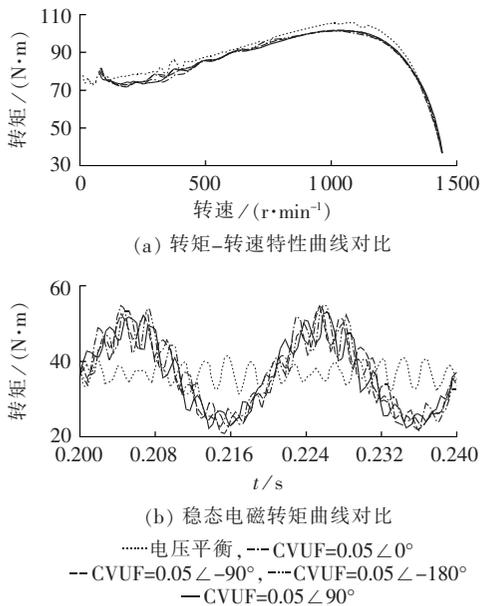


图 11 $k_v=0.05$ 且正序电压 380 V 与平衡时转矩性能对比
 Fig.11 Comparison of torque performances between balanced condition and condition that $k_v=0.05$, positive-sequence voltage is 380 V

由图 11(b)中可知:电压不平衡时,异步电机稳态电磁转矩存在较大的 2 倍频脉动分量,例如 θ_v 为 0° 、 -90° 、 -180° 、 90° 时的 2 倍频脉动分量分别为 12.7、12.8、12.5、12.1 N·m,差值保持在 5% 以内;另外,受定子开槽影响,电磁转矩波形中也含有一定的 17 次谐波分量,例如,电压平衡时电磁转矩为 2.5 N·m,电压不平衡情况下, θ_v 为 0° 、 -90° 、 -180° 、 90° 时电磁转矩分别为 2.7、2.5、2.5、2.3 N·m,与电压平衡时均相差较小。综上,可认为 CVUF 相角对电机起动性能及稳态转矩脉动分量影响均较小。

6 实验验证

采用在电机绕组进线端串联电抗器的方式制造某几种电压不平衡条件,利用时步有限元法模拟实测得到的三相不平衡电压及负载,并对仿真与实测结果进行对比。例如,在电机带 75% 负载且 CVUF 为 $0.03 \angle -73.6^\circ$ 时,定子绕组的实测与仿真三相电流波形分别如图 12(a)、(b)所示。其中实测三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的有效值分别为 5.14、4.70、6.54 A,仿真三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的有效值分别为 5.07、4.70、6.53 A,因此实测与仿真定子三相电流近似相等。

根据 GB1032—2012《三相异步电动机试验法》中 B 法可实测并计算得到电机内部各项损耗^[16],并将其与有限元损耗计算结果进行对比。表 3 中所示为 75% 负载、 $k_v=0.05$ 时各项损耗的仿真与实测结果对比,由表中可看出电压不平衡时,仿真与实测各项损耗存在一定误差,但总体接近一致。

综上,实测与仿真得到的定子电流及各项损耗

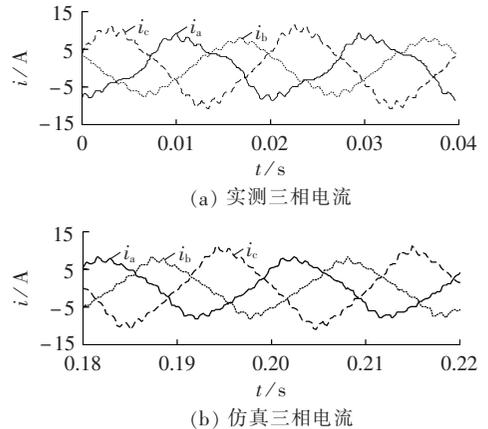


图 12 三相定子电流的实测与仿真结果对比

Fig.12 Comparison of three-phase stator currents between measured and simulative results

表 3 75% 负载及 $k_v=0.05$ 时仿真与实测各项损耗对比

Tab.3 Comparison of losses between measured and simulative results when load rate is 75% and k_v is 0.05

$\theta_v / (^\circ)$	$P_{\text{Cu1}} / \text{W}$		$P_{\text{Cu2}} / \text{W}$		P_{Fe} / W	
	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测
-78.4	239.1	250.7	141.4	137.6	119.1	104.6
-81.4	236.9	247.1	134.1	132.2	121.2	113.4
-85.4	247.4	248.4	126.8	123.9	126.6	125.9

基本一致,验证了时步有限元方法及文中分析结论的正确性。

7 结论

本文针对一台 5.5 kW 异步电机建立了基于时步有限元的损耗计算模型,在给定 $k_v=0.05$ 、正序电压 380 V 及 75% 负载条件下,分析了 CVUF 相角对定子电流、损耗及转矩性能的影响,并验证了文中分析结果的正确性,主要结论如下。

a. 定子三相电流随 CVUF 相角均呈正弦变化规律,为避免绕组过热且使电机保持较高带载能力,应避免最坏运行点。

b. CVUF 相角对定子铜耗的影响相对较大,但工程实际中其对各项损耗的影响均可忽略不计。

c. 电压不平衡会造成异步电机最大、最小转矩均有不同程度的减小,且稳态电磁转矩中会出现较大的脉动分量,但相同 CVUF 幅值及正序电压条件下的 CVUF 相角对其影响均较小。

由于电压不平衡情况较为复杂,且与负载组合状况较多,本文仅针对 75% 负载及正序电压 380 V 条件下的不平衡电压进行了计算分析,对于其他正序电压及负载条件下的分析将在后续研究中开展。

参考文献:

- [1] WOLL R F. Effect of unbalanced voltage on the operation of polyphase induction motors[J]. IEEE Trans on Industry App-

- lications, 1975, IA-11(1):38-42.
- [2] KERSTING W H. Causes and effects of unbalanced voltage serving an induction motor[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(1):165-170.
- [3] PILLAY P, MANYAGE M. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(4):813-822.
- [4] WANG Yawjuen. Analysis of effect of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2001, 16(3):270-275.
- [5] 王秀和, 杨玉波, 付大金. 基于瞬态模型的不对称供电三相感应电动机分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2):126-131.
WANG Xiuhe, YANG Yubo, FU Dajin. Analysis of three-phase induction motor fed by unbalanced voltages with transient model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2):126-131.
- [6] FAIZ J, EBRAHIMPOUR H, PILLAY P. Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(4):657-662.
- [7] DYMOND J H, STRANGES N. Operation on unbalanced voltage: one motor's experience and more[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2007, 43(3):829-837.
- [8] ANWARI M, HIENDRO A. New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under and overvoltage unbalance[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(3):619-625.
- [9] LEE Chingyin. Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(2):202-208.
- [10] 全国旋转电机标准化技术委员会. GB/T22713—2008 不平衡电压对三相笼型感应电动机性能的影响[S]. 北京:中国标准化出版社, 2009.
- [11] IEC 61000-4-30 Edition 3.1—2008. ElectroMagnetic Compatibility (EMC)-part 4-30 testing and measurement techniques-power quality measurement methods [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2008.
- [12] IEC 60034-26 Edition 1—2006. Rotating electrical machines-part 26: effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2008.
- [13] 赵海森, 刘晓芳, 罗应立. 电压偏差条件下笼型感应电机的损耗特性[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5):13-19.
ZHAO Haisen, LIU Xiaofang, LUO Yingli. Losses characteristics of cage induction motors under voltage deviation conditions[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(5):13-19.
- [14] 赵海森, 罗应立, 刘晓芳. 异步电机空载铁耗分布的时步有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30):99-106.
ZHAO Haisen, LUO Yingli, LIU Xiaofang. Analysis on no-load iron losses distribution of asynchronous motors with time-stepping finite element method [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30):99-106.
- [15] 王正茂, 阎治安. 电机学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2000:301-304.
- [16] 全国旋转电机标准化技术委员会. GB/T1032—2012 三相异步电动机试验方法[S]. 北京:中国标准化出版社, 2012:35-40.

作者简介:



刘晓芳

刘晓芳(1961-),女,内蒙古呼和浩特人,教授,从事交流电机非正常运行等方面的研究(E-mail: liuxf@ncepu.edu.cn);

张元星(1988-),男,河南三门峡人,硕士,从事电力能效分析及节能咨询方面的工作(E-mail: zhangyuanxing1988@163.com);

赵海森(1982-),男,河北邢台人,副教授,博士,研究方向为电机损耗计算及节能(E-mail: zhaohisen@163.com);

王翔宇(1988-),男,安徽亳州人,硕士,从事电机能耗分析及节能技术研究工作(E-mail: 000wangxiangyu@sina.com);

韩志(1988-),男,山东滕州人,硕士,从事永磁电机设计及节能技术研究工作(E-mail: 854983853@qq.com);

王鹤(1974-),女,辽宁辽阳人,高级工程师,博士,从事电力需求侧管理、电力市场等方面的研究(E-mail: wanghe@epri.sgcc.com.cn)。

Influences of CVUF's phase-angle factor on operation performance of asynchronous motor under unbalanced three-phase grid voltage

LIU Xiaofang¹, ZHANG Yuanxing¹, ZHAO Haisen¹, WANG Xiangyu¹, HAN Zhi¹, WANG He²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Since the unbalanced grid voltage impacts on the proper operation of asynchronous motor, the influence of the phase-angle factor of CVUF (Complex Voltage Unbalance Factor) on the operational performance of asynchronous motor during three-phase grid voltage unbalance is studied. The relationship between CVUF and the amplitude/phase of three-phase winding voltage is analyzed, based on which, the influence of CVUF's phase-angle factor on the stator current, loss and torque performance of a 5.5 kW Y132S-4 asynchronous motor is studied when the positive-sequence grid voltage is 380 V, the CVUF's amplitude is constant and the load rate is 75%. Results show that, the three-phase stator current follows the sinusoidal variation of CVUF's phase-angle; the asynchronous motor should not operate at the point of maximum state current to avoid the deep drop of load ability and the overheating of windings; CVUF's phase-angle has slight influence on the losses, startup performance and torque ripple components. The three-phase stator currents and losses of asynchronous motor are calculated for different voltage balance conditions and the calculative results are basically the same as the measured results, showing the correctness of the theoretical analysis.

Key words: voltage unbalance; asynchronous motor; CVUF; stators; rotors; three phase currents; losses; torque performance