

# 三相电流不平衡及谐波对电网损耗的影响分析

随着经济和社会的发展,电能质量越来越引起人们的重视。考量电能质量对电网损耗的影响能使人们准确认识其所产生的危害并据此提出合理的方案进行整改治理,具有重要意义。运用等效电阻法,首先通过理论推导出电流不平衡所引起的损耗计算公式;其次利用叠加原理推导出谐波条件下所引起的损耗计算公式;最后综合考量二者同时存在时所引起附加损耗,并对每一部分都进行仿真验证。结果表明当电流不平衡与谐波同时存在时,所引起的附加损耗大于二者单独存在所引起的附加损耗之和,仿真验证也予以证实。

冯成<sup>1</sup> 徐长宝<sup>1,2</sup> 李怀宇<sup>2</sup> 丁阳<sup>3</sup> 冯冬涵<sup>3</sup>/1.贵州电网有限责任公司电力科学研究院 2.上海电力学院电气工程学院 3.电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学)

## 0 引言

现代社会中,电能作为最广泛使用的一种能源,其应用程度已经成为衡量一个国家发展水平的主要标志之一<sup>[1]</sup>。随着工业规模的扩大和科学技术的发展,国民经济各部门的用电量不断增加;各种性能好、效率高但对电源特性变化敏感的高科技设备的使用,使得用户对电能质量<sup>[2]</sup>的要求也越来越高;而由于大功率电力电子开关设备的广泛使用,导致电能质量问题所引起的负面影响越来越严重<sup>[3]</sup>,使得电能质量问题成为电力系统研究领域研究热点。

电能质量描述的内容是通过电力系统传输到消费终端负荷的交流电能品质。一个理想的电力系统应以恒定的频

率和正弦波形,按规定的电压水平对用户供电。对于三相交流电力系统,各相的电压和电流应保持幅值大小相等,相位互差 $120^\circ$ 的状态。任何原因导致电力系统不能按上述情况运行均属于电能质量问题。目前评价电能质量优劣的指标主要有:电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、谐波、三相不平衡、电压暂降和中断、暂态过电压和瞬态过电压。而相比较之下,谐波及三相不平衡对电网损耗造成的影响更大。

本文首先分别推导了不平衡及谐波情况下系统损耗的计算公式,继而推导出不平衡及谐波同时存在时系统损耗的计算公式;并针对上述三种情况分别在仿真软件中建立模型仿真,将仿真结果与推导公式进行对比分析。

## 1 附加损耗的计算公式推导

理想的三相交流电力系统中,三相电压应该有相同的幅值,且相位角互差 $120^\circ$ ,这样的系统叫作三相平衡系统。

电力系统三相不平衡的来源可以大致分为两种:事故性和正常性<sup>[4]</sup>。事故性不平衡是输配电网由于发生故障而导致的三相不平衡。例如单相断线、两相短路、两相接地短路和三相短路等故障<sup>[5-9]</sup>。在以上故障情况下,电力系统不可以长期工作,所以一般通过电力系统保护、辅助装置作用来隔离故障元件,使电力系统的其他部分在短期内恢复正常运行。正常性电力系统三相不平衡主要是由负荷不平衡、系统三相阻抗不对



冯成/工程师

### 关键词/Keywords

电能质量 ·  
电流不平衡 ·  
谐波 ·  
线路损耗 ·

贵州电网有限责任公司支持项目(K-GZ2013-442),国家自然科学基金资助项目(51477097)。

称以及消弧线圈的不正确调谐所引起<sup>[10]</sup>。由于阻抗不对称及消弧线圈不正确调谐所引起的不平衡相对于负荷引起的不平衡较小,本文仅对由负荷引起的不平衡进行分析探讨。

### 1.1 不平衡损耗计算公式推导

三相不平衡度是世界各国衡量电力系统三相不平衡程度的最重要指标。三相不平衡度通常被定义为负序分量(或零序分量)与正序分量的比值。

针对三相不平衡,国家于2008年颁布了GB/T 15543—2008《电能质量三相电压不平衡》标准<sup>[11]</sup>。该标准规定了负序基波电压分量引起的电压不平衡度的限值,并给出了计算公式。该标准将衡量点选在电网的公共连接点,以便在保证其他用户正常用电的基础上,给干扰源用户以最大的限值。标准的出发点在于维护电网的正常运行,而对于系统损耗来说,与其相关较大的则是系统电流情况,所以在计算电力系统输电线路中的电能损耗时,采用电流序分量要比采用电压序分量更加直接,误差更小。综上,依据对电压不平衡度的计算公式,可相应得出电流不平衡度的计算公式。

三相不平衡时,假设线路三相电流分别为 $I_a$ 、 $I_b$ 和 $I_c$ ,则依据对称分量法可将其分解为正序电流 $I_1$ 、负序电流 $I_2$ 以及零序电流 $I_0$ 。则相电流与序电流之间的关系如下

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中,  $a = e^{j120^\circ}$ 。

依据负序电压不平衡度及零序电压不平衡度的概念定义负序电流不平衡度及零序电流不平衡度。则负序电流不平衡度及零序电流不平衡度的表达式分别如下

$$\beta_2 = \frac{I_2}{I_1} \quad (2)$$

$$\beta_0 = \frac{I_0}{I_1} \quad (3)$$

式中,  $I_1$ 、 $I_2$ 和 $I_0$ 分别为正序、负序和零序电流的幅值。

假设正序、负序和零序电流为

$$\begin{cases} I_1 = I_1 \angle 0^\circ \\ I_2 = I_2 \angle \alpha_2 \\ I_0 = I_0 \angle \alpha_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\alpha_2$ 、 $\alpha_0$ 分别为负序电流与零序电流相位。

则三相电流可用序电流表达为

$$\begin{cases} I_a = I_1 + I_2 \cos \alpha_2 + I_0 \cos \alpha_0 + j(I_2 \sin \alpha_2 + I_0 \sin \alpha_0) \\ I_b = -\frac{1}{2}I_1 - I_2 \left( \frac{1}{2} \cos \alpha_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha_2 \right) + I_0 \cos \alpha_0 + j \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2}I_1 + I_2 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha_2 - \frac{1}{2} \sin \alpha_2 \right) + I_0 \sin \alpha_0 \right] \\ I_c = -\frac{1}{2}I_1 + I_2 \left( -\frac{1}{2} \cos \alpha_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha_2 \right) + I_0 \cos \alpha_0 + j \left[ \frac{\sqrt{3}}{2}I_1 + I_2 \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha_2 - \frac{1}{2} \sin \alpha_2 \right) + I_0 \sin \alpha_0 \right] \end{cases} \quad (5)$$

根据上式可得

$$I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 = 3(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2) \quad (6)$$

在进行负荷不平衡影响的研究时,通常假设正序负荷电流为输电线路额定电流值。同样功率因数也通常被假定为1.0。这意味着输电线路只向线路末端的不平衡负荷传输有功功率。虽然负荷的功率因数在最终系统三相不平衡的影响可以忽略不计。但是,功率因数的提高可以减少电力系统运行成本、稳定供电电压等级和减少输电线路损耗。所以,为了取得上述优点,提高功率因数到接近1.0都是非常经济的。

假设三相线路电阻为 $R$ 。三相平衡时,线路电流为 $I$ ,则线路损耗为

$$P = 3I^2 R \quad (7)$$

则三相不平衡时线路损耗为

$$P_{\text{unba}} = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)R = 3(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2)R \quad (8)$$

由于三相平衡时线路电流大小等于三相不平衡时正序电流大小,即

$$I = I_1 \quad (9)$$

则不平衡时线路损耗计算公式可转化为

$$P_{\text{unba}} = 3I^2(1 + \beta_2^2 + \beta_0^2)R \quad (10)$$

由此可知线路损耗随着电网中负序电流与零

序电流的增加而增加, 增加比率等于负序不平衡度与零序不平衡度的平方和。

当有输电线路的任何一段末尾未接地时, 那么线路中就不存在电流零序分量, 式(10)可转化为

$$P_{\text{unba}} = 3I^2(1 + \beta_2^2)R \quad (11)$$

式(10)和式(11)表明, 线路损耗只取决于复功率系数的幅值部分, 并不会受到复功率系数相角部分的影响。

## 1.2 谐波损耗计算公式推导

理想情况下, 三相交流电力系统中电压电流应为某一特定频率(50 Hz或60 Hz)的正弦波形。然而随着电力电子设备的广泛应用以及非线性负荷的日益增多, 导致电压电流波形产生畸变, 对该波形进行傅里叶级数分解得到其不只含有该特定频率的分量, 还含有其他频率的分量。对此, 国际上对谐波的定义如下: 谐波为一个周期电气量的正弦波分量, 其频率为基波频率的整数倍。而我国对谐波的定义为: 对周期性交流量进行傅里叶级数分解, 得到频率为基波频率大于1整数倍的分量<sup>[12]</sup>。以上两个定义都表明: 谐波是特指频率为基波整数倍的量。

对于非正弦周期电流的瞬时值, 可用三角级数表示, 即

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega_1 t + \alpha_h) \quad (12)$$

式中,  $h$ 为谐波次数, 正整数(当 $h=1$ 时为基波);  $I_0$ 、 $I_h$ 为直流和 $h$ 次谐波分量电流有效值;  $\omega_1$ 为基波角频率;  $\alpha_h$ 为 $h$ 次谐波分量的初相角。

为了表示畸变波形偏离正弦波形的程度, 常用的指标有第 $h$ 次谐波含有率和总谐波畸变率。

第 $h$ 次谐波电流含有率为

$$\text{HRI}_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (13)$$

谐波电流总畸变率为

$$\text{HRI} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (14)$$

同理也可以定义第 $h$ 次谐波电压含有率及谐波电压总畸变率。

第 $h$ 次谐波电压含有率为

$$\text{HRU}_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (15)$$

谐波电压总畸变率为

$$\text{HRU} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \times 100\% \quad (16)$$

假设线路中电流如式(12)所示, 由叠加原理可知, 线路的谐波损耗为各次谐波损耗之和, 则线路附加的谐波损耗为

$$P_{\text{ha}} = 3 \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 R_h \quad (17)$$

式中,  $R_h$ 为第 $h$ 次谐波阻抗。

若用谐波电流含有率表示, 式(17)可转化为

$$P_{\text{ha}} = 3I_1^2 \sum_{h=1}^{\infty} \text{HRI}_h^2 R_h \quad (18)$$

由式(18)可知, 谐波附加损耗不仅与各次谐波含有率有关, 还与谐波阻抗有关。由于谐波次数较高时, 线路中会出现趋肤效应; 而且随着谐波次数的增高, 趋肤效应会越来越明显。因而简单的以基波阻抗代替谐波阻抗就会出现较大的误差, 并不能准确模拟实际情况。

对于谐波阻抗的大小, 国内外学者提出了多种模型。文献[13]提出采用数值拟合的方法, 通过多次得到多组数据, 然后运用数学方法对这些数据进行处理, 得到相应的拟合公式。文献[14]提出了交流电阻系数 $F_{\text{hr}}$ 这个概念, 用来表征同一线路在通入 $h$ 次谐波交流电流时, 线路交流电阻与直流电阻的比值, 依此比值得到谐波阻抗值。上述两种方案均存在计算较为烦琐、所需参数较多的缺陷。本文采用应用较为广泛的确定谐波阻抗的方法。即在谐波环境下, 考虑趋肤效应时, 导体的各次谐波阻抗为

$$R_h = \sqrt{h}R \quad (19)$$

因而线路的谐波附加损耗计算公式转化为

$$P_{\text{ha}} = 3 \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{h} I_h^2 R \quad (20)$$

### 1.3 不平衡及谐波对线路损耗的综合影响

当线路中既存在不平衡又存在谐波时,不平衡会跟谐波相互影响,进而加剧其对线路的影响。

假定不平衡及谐波同时存在时,三相电流第 $h$ 次谐波分量分别为 $I_{ah}$ 、 $I_{bh}$ 和 $I_{ch}$ ,将谐波电流按对称分量法分解为谐波正序、负序和零序电流 $I_{1h}$ 、 $I_{2h}$ 和 $I_{0h}$ 。其他参量如之前所述,则不平衡及谐波同时存在时依据叠加原理线路损耗的计算公式为

$$P_{\text{unba-ha}} = (I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2)R + \sum_{h=2}^{\infty} (I_{1h}^2 + I_{2h}^2 + I_{0h}^2)\sqrt{h}R \quad (21)$$

同样忽略零序电流,则上式可转化为

$$P_{\text{unba-ha}} = 3(I_1^2 + I_2^2)R + 3 \sum_{h=2}^{\infty} (I_{1h}^2 + I_{2h}^2)\sqrt{h}R \quad (22)$$

保证平衡与不平衡情况下谐波含量相同,对于不同次谐波,平衡时的谐波电流与不平衡时的谐波电流有如下关系

$$\begin{cases} I_h = I_{1h} & \text{当 } h = 3n+1 \text{ 时} \\ I_h = I_{2h} & \text{当 } h = 3n+2 \text{ 时} \end{cases} \quad (23)$$

因此可得

$$\sum_{h=2}^{\infty} (I_{1h}^2 + I_{2h}^2)\sqrt{h}R > \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2\sqrt{h}R \quad (24)$$

因而可以推出当不平衡及谐波同时存在时,线路所产生的附加损耗大于不平衡及谐波单独存在时所产生的附加损耗之和。且不平衡度越大,综合影响与二者单独影响之和的差就越大。

为了量化考量电流不平衡、谐波及二者共同存在时对线路附加损耗增量的具体情况,本文用损耗增比的概念来表示。即

$$\Delta P = \frac{P' - P}{P} \times 100\% \quad (25)$$

式中, $P'$ 为电流不平衡、谐波或二者共存时线路实际损耗; $P$ 为理想状态下,即平衡无谐波情况下线路的损耗。

## 2 附加损耗的试验仿真

在仿真软件DIgSILENT中以某电网实际数据建立仿真模型,首先选中其中一条线路作为研究对象,验证文中所推公式的正确性,其次考量该系

统下总的电网损耗随着负载不平衡变化的情况。

### 2.1 不平衡损耗的仿真验证

首先选取其中一条线路作为研究对象,设定系统中三相阻抗相同,在保证总负荷不变的情况下,逐渐调节负荷在三相间的分配比例,得到不同不平衡度情况下的损耗情况。

图1为线路损耗增比随着负序电流不平衡变化而变化的具体情况。其中横轴为线路中的负序电流不平衡度;纵轴为不平衡时的损耗增比。

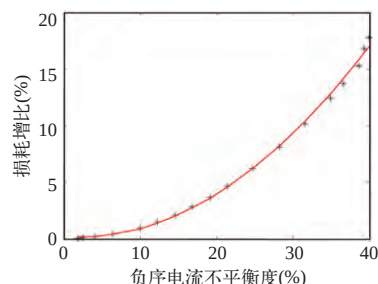


图1 线路损耗增比随负序电流不平衡度变化的关系曲线

由图1可以看出,仿真结果与公式推导结果相同。即:当仅有负序电流不平衡时,线路损耗随着负序电流不平衡度的增加而增加,且增加的比例与负序电流不平衡度的平方成正比。

### 2.2 谐波附加损耗的仿真验证

对于所建立的仿真系统,选取其中一条线路作为研究对象,设定系统中三相阻抗相同,并设定第 $h$ 次谐波阻抗为基波阻抗的 $\sqrt{h}$ 倍,使负荷三相平衡,在保证总负荷不变的情况下,选取离该线路较近的一个负荷为谐波源,依次设定该谐波源为5次、7次、11次、13次和17次谐波源,并分别调整其谐波含量。记录试验数据,如图2所示。

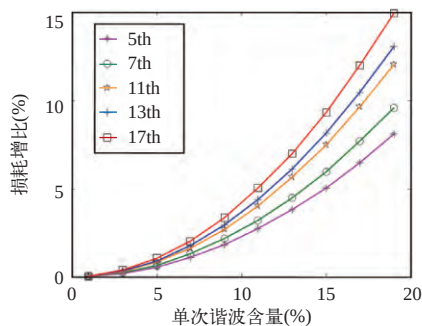


图2 损耗增比随谐波含量变化的关系曲线

图2中,横轴为单次谐波含量,纵轴为该次谐波损耗占基波损耗的百分比。由图2可以看出,谐波损耗占比随着谐波含量的增加而增加,而且当谐波含量相同时,高次谐波的损耗占比大于低次谐波的损耗占比,其原因在于随着谐波次数的增加,趋肤效应越来越明显,导致高次谐波阻抗大于低次谐波阻抗。由图2可以看出,当17次谐波含量为19%时,谐波损耗增加至基波损耗的14.92%,可见谐波对线路损耗的影响非常大。即使控制总谐波畸变率在5%以内,谐波产生的附加损耗也约占基波损耗的0.56%~1.03%,而且高次谐波所占比重越大,其附加损耗也就越大。虽然该比例较小,但由于电网损耗的基数巨大,因此每年因谐波导致的附加损耗的损失也是相当可观的。

### 2.3 不平衡及谐波综合附加损耗的仿真验证

在之前建立的仿真系统上,通过逐渐改变三相负荷值及谐波源发出谐波的含量进而调节线路上的电流不平衡度与谐波电流含量,得到不同电流不平衡度及谐波含量的情况下线路损耗的值,得出电流不平衡及谐波电流同时存在时对线路损耗的综合影响。与之前所用方式类似,同样用增加损耗与平衡无谐波时线路损耗的比值作为分析对象。

由之前分析可知,对于不同次谐波,谐波电流含量相同时所产生的谐波损耗不同,且差异较大。因此本节谐波含量是指总谐波畸变率,且各次谐波按照一定的比例进行分配。假定谐波总畸变率为100,各次谐波分配比例如下表所示。

表 谐波含量分配比例

| 谐波次数    | 5  | 7    | 11   | 13   | 17   |
|---------|----|------|------|------|------|
| 谐波含量(%) | 77 | 53.5 | 29.6 | 14.2 | 10.9 |

如图3所示,色条与损耗占比相对应,由图3可以看出,线路附加损耗随着电流不平衡度及谐波含量的增加而增加,且增加幅度大于电流不平衡及谐波单独作用于线路所引起的附加损耗之和,以负序电流不平衡度为31%、谐波含量为15%为例,二者所引起的附加损耗分别为9.99%与5.61%,而不平衡与谐波同时作用于线路时所引起

的附加损耗增量为16.58%,比二者单独作用于线路引起的损耗增量之和增大0.98%。

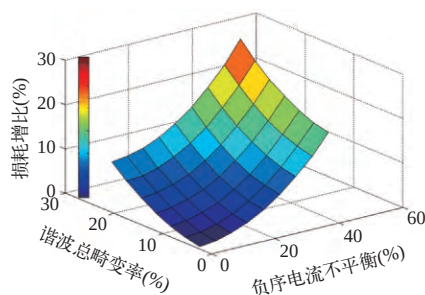


图3 附加损耗随电流不平衡度与谐波含量的变化关系曲面

### 2.4 不平衡及谐波对电网损耗的影响

基于不平衡及谐波对单条线路损耗影响的分析,根据系统中的拓扑结构,可以得到该系统的节点导纳矩阵,据此可以推导出负荷不平衡及谐波对电网整体损耗的计算公式,其结论也必然与之前的结论相似,即不平衡及谐波同时存在时引起的电网损耗增量大于二者单独存在时引起的增量之和。本文对所建立的系统进行仿真验证,试验结果予以证实。

## 3 结束语

电网谐波与不平衡是电能质量问题的两个主要方面。关于不平衡,国家只规定了电压不平衡的限值,而对电流不平衡却没有作任何规定,实际上规定电压不平衡限值可以保证电力系统的电压安全,而电流不平衡的程度则从侧面反映了系统损耗的增加,随着节能降耗的推进,此方面应引起有关部门的重视。关于谐波,由于电力电子技术的发展,使得电网中谐波水平逐渐上升,其所带来的危害不仅仅是增加系统损耗,还会危及网络中设备寿命及系统安全。对于电网损耗而言,不平衡与谐波同时存在所产生的附加损耗大于二者单独存在时对电网产生的附加损耗之和,而且随着不平衡与谐波含量的增加,其正相关特性越显著。因此,对于电能质量的管理不能仅仅局限于对单个指标的控制,还应该从多个方面进行综合治理,以期达到最优效果。

# 参考文献

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001 (10): 5-12.
- [2] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析 [J]. 电网技术, 2001 (3): 66-69.
- [3] 李文才, 李燕, 王希平, 等. 低压配电网的谐波损耗与综合治理 [J]. 电气应用, 2009 (3): 48-50.
- [4] 周海涛, 李铎. 浅谈配电网三相不平衡产生的原因与对策 [J]. 中国科技博览, 2011 (24): 80.
- [5] 李彪. 落水洞电厂6 kV母线三相电压不平衡原因分析 [J]. 云南水利发电, 2006, 21 (5): 51-52.
- [6] 宋冰. 35 kV及以下小电流接地系统发生电压不平衡原因分析 [J]. 科技资讯, 2007 (12): 50.
- [7] 袁伟. 浅谈小电流接地系统母线电压不平衡的原因分析及对策 [C]. 云南电力技术论坛论文集, 2010: 1702-1708.
- [8] 周鹰翔. 小电流接地系统发生电压不平衡原因分析 [J]. 中国电力教育, 2009 (2): 308-309.

- [9] 覃翠娥. 中性点不接地系统电压不平衡原因分析及处理 [J]. 安徽电力, 2013 (4): 27-29.
- [10] 林海雪. 电能质量国家标准系列讲座第5讲三相电压不平衡标准 [J]. 建筑电气, 2011 (10): 25-29.
- [11] GB/T 15543—2008 电能质量三相电压不平衡 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] GB/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [13] Makram E B, Thompson R L, Girgis A A. A new laboratory experiment for transformer modeling in the presence of harmonic distortion using a computer controlled harmonic generator [J]. IEEE Transactions on Power System, 1988, 3 (4): 1857-1863.
- [14] Hurley W G, Gath E, Breslin J G. Optimizing the AC resistance of multilayer transformer windings with arbitrary current waveforms [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 15 (2): 369-376.

(收稿日期: 2015-08-25) EA

(上接第33页)

- [2] 赵朝会, 张卓然, 秦海鸿. 混合励磁电机的结构和原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] Zhang Jianzhong, Cheng Ming, Zhu Xiaoyong. A novel three-phase doubly salient permanent magnet generator [C]. ICEMS, Nanjing, China, 2005: 407-411.
- [4] 张建忠, 程明. 新型直接驱动外转子双凸极永磁风力发电机 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (12): 15-21.
- [5] 黄劭刚, 夏永洪, 张景明. 基于ANSYS软件的电机电磁场有限元分析 [J]. 微特电机, 2004 (5): 12-14.
- [6] 王朔, 冯浩. 双转子异步电动机电磁场的有限元分析 [J]. 机电工程技术, 2007, 36 (10): 25-28.
- [7] 杜杏, 梅顺齐, 王志伟, 等. 圆筒式磁力驱动机

- 构磁转子的耦合磁场分析 [J]. 轻工机械, 2011, 29 (6): 56-58, 62.
- [8] Chen Zhihui, Sun Yaping, Yan Yangguang. Static characteristics of a novel hybrid excitation doubly salient machine [C]. IEEE ICEMS 2005: 718-721.
- [9] 胡勤丰, 孟小利, 严仰光. 双凸极永磁电机气隙对电机静态特性的影响研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37 (1): 25-28.
- [10] 程晓玲, 王晓远. 气隙长度对双凸极永磁电动机转矩的影响研究 [J]. 微电机, 2008, 41 (11): 15-18.
- [11] 孙亚萍, 陈志辉, 严仰光. 转子极弧对永磁双凸极电机性能的影响 [J]. 微特电机, 2006 (12): 10-12.

(收稿日期: 2015-10-14) EA