

文章编号: 1000-582X(2011)09-142-06

小型单相同步发电机并列条件仿真分析

王维俊^{1a,2}, 杨静², 廖勇^{1b}, 孙跃^{1a}, 毛龙波²

(1. 重庆大学 a. 自动化学院; b. 电气工程学院, 重庆 400044; 2. 后勤工程学院 机电系, 重庆 401311)

摘要: 小型单相同步发电机并列控制器设计时, 并列参数选择需要限制合闸后冲击电流不大于一定范围。通过建立小型单相同步发电机并列系统的场路耦合时步有限元模型, 并采用 ANSYS 的 APDL 语言编制的计算软件, 研究了两台单相同步发电机在不同并列参数差值下并列的暂态过程, 得出在 3 个并列参数差值单因素及多因素作用下合闸后冲击电流的大小和变化规律, 为单相同步发电机并列控制器设计提供了准确的并列条件。

关键词: 同步发电机; 并列; 场路耦合时步有限元法; 仿真

中图分类号: TM301.4

文献标志码: A

Simulation on parallel conditions for small single phase synchronous generators

WANG Wei-jun^{1a,2}, YANG Jing², LIAO Yong^{1b}, SUN Yue^{1a}, MAO Long-bo²

(1a. College of Automation; 1b. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Department of Mechanical and Electric Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, P. R. China)

Abstract: The controller of paralleling small single phase synchronous generators should restrict the dash currents in generators below a defined value when it switches on. A field-circuit coupling time-stepping finite element model of the parallel system is built. The computation program is written in APDL languages of ANSYS and the transient process of paralleling two single phase synchronous generators in various parallel parameters are studied. The value and variation of the dash currents in two generators when switch on at various differences of three parallel parameters are analyzed and the accurate parallel conditions are provided to the parallel controller.

Key words: synchronous generator; parallel; field-circuit coupling time-stepping finite element; simulation

小型单相同步发电机在军事上广泛用作应急电源, 主要采用单机供电, 但在部队执行野外任务时, 常常出现发电机单机容量不能满足负载需要的情况, 需要由小型单相同步发电机并列起来供电。

由于单相同步发电机负载运行时电压波形正弦畸变率大, 稳态频率波动一般比三相同步发电机大,

其主要以单机运行为主, 国内外罕见其并列运行的研究报道, 并列控制器的设计缺乏有效的并列条件作为依据。

小型单相同步发电机并列控制器设计时并列参数的选择应满足自动准同期并列合闸后的冲击电流不超过合闸断路器两侧的待并系统与运行系统中容

收稿日期: 2011-04-20

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC 2009bb2344)

作者简介: 王维俊(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电机理论与计算机仿真、电机控制与检测技术、新能源发电的研究。(E-mail) wjwang866@126.com。

量较小一侧的发电机总额定电流的100%,而单相同步发电机单机运行时定、转子电路中都含有较强的谐波^[1-2],在非理想条件下并列合闸后,每台发电机绕组电流中都有合闸引起的暂态分量,情况十分复杂,难以用解析式准确表达。因此,需要对单相同步发电机并列的暂态过程进行分析计算,得到在不同并列参数差值下合闸后的冲击电流大小,从理论上指导单相同步发电机并列控制器的设计和单相同步发电机的快速并列。

单相同步发电机并列时,合闸引起的过渡过程非常短,用实验的方法难以得到准确的数据,为了给单相同步发电机的快速并列提供理论指导,笔者用场路耦合时步有限元法建立了能准确反映单相同步发电机并列暂态过程的并列系统模型,对2台单相同步发电机在不同并列参数差值下合闸后的暂态过程进行仿真计算,研究了在3个并列参数差值单因素及多因素作用下合闸后冲击电流的大小和变化规律,得出了单相同步发电机的并列条件并用实验验证了所得到的并列条件。

1 小型单相同步发电机并列系统模型

1.1 并列系统电磁场有限元模型

单相同步发电机并列系统电磁场有限元模型建立时有如下假设^[3-9]:

1)假设单相同步发电机并列系统中各台发电机内的电磁场是似稳场,忽略位移电流。

2)各台发电机中直线部分的电磁场为二维分布,端部磁场以端部漏电感的形式加以考虑。

3)认为材料各向同性,忽略铁磁材料的磁滞效应,把 $B-H$ 曲线当作单值曲线。

4)忽略各台发电机的定子、转子叠片铁芯及定子绕组、励磁绕组中的涡流。

5)忽略电导率 σ 和磁导率 μ 的温度效应。

单相同步发电机并列系统的电磁场有限元模型是瞬态电磁场方程式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J. \quad (1)$$

在两台发电机的有限元剖分区域的离散。在发电机定、转子铁芯及气隙区域, $J=0$,在发电机定子绕组及励磁绕组区域,忽略绕组导线中的涡流, $J = \frac{d_w n_w I_w}{a_w S_w}$,其中, a_w 为绕组 w 的并联支路数; I_w 为绕组电流; n_w 为绕组匝数; S_w 为绕组电流流入或流出区域截面积; d_w 为绕组电流方向的量:在绕组电流为流入时, $d_w = -1$,绕组电流为流出时, $d_w = 1$ 。在

阻尼条区域,计及实心导体中的涡流, $J = \sigma \frac{u_d}{l_{\text{def}}}$

$\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$,其中, l_{def} 为阻尼条有效长度; σ 为阻尼条材料电导率; u_d 为阻尼条两端电压。

用线性三角形单元剖分,可得到单相同步发电机并列系统的电磁场有限元方程离散形式:

$$\begin{cases} C_1 \frac{\partial A_1}{\partial t} + K_1 A_1 - G_1 u_{d1} - F_1 I_1 = 0, \\ C_2 \frac{\partial A_2}{\partial t} + K_2 A_2 - G_2 u_{d2} - F_2 I_2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

边界条件:

$A_i = 0$ (节点 i 在两台发电机的定子外圆或转子内圆上)。

式(2)中各向量和系数矩阵中下标1代表并列系统模型中发电机1的相关参数值,下标2代表并列系统模型中发电机2的相关参数值。

1.2 并列系统外电路模型

单相同步发电机并列供电时与用电设备之间的距离较短,因此,在网络计算时,可以忽略连接电缆的阻抗。发电机并列合闸前后改变的仅是发电机定子绕组电路连接形式,对各台发电机的励磁电路连接形式及阻尼绕组电路连接形式没有影响。

单相同步发电机并列系统中发电机定子部分电路如图1所示。图中各变量下标的1代表发电机1的相关参数,2代表发电机2的相关参数,若无特殊说明,下文其余地方也是同样表示法。图中 R_{l2} 为一个大的负载电阻,用来模拟发电机的空载运行。

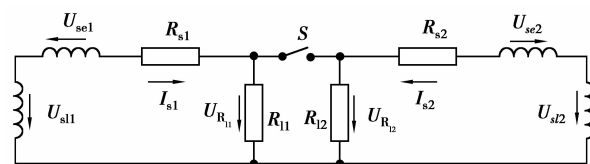


图1 发电机并列系统定子部分电路图

合闸前发电机并列系统中定子部分电路方程为:

$$\begin{cases} U_{s11} + U_{se1} - I_{s1} R_{s1} - I_{s1} R_{l1} = 0, \\ U_{s12} + U_{se2} - I_{s2} R_{s2} - I_{s2} R_{l2} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{se} 为发电机的定子绕组端部漏磁链 ψ_{se} 变化所对应压降; U_{sl} 为发电机的定子绕组直线部分磁链 ψ_{sl} 变化所对应压降; R_s 为发电机的定子绕组电阻; I_s 为通过发电机定子绕组的电流。

合闸后,单相同步发电机并列系统中定子部分电路见图2。

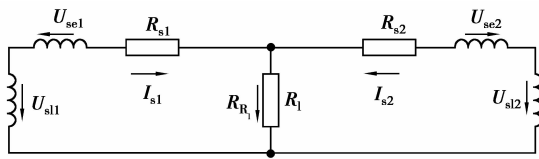


图 2 合闸后发电机并列系统定子部分电路图

合闸后发电机并列系统中定子部分电路方程为:

$$\begin{cases} U_{sl1} + U_{se1} - I_{s1}R_{s1} = I_{R1}R_1, \\ U_{sl2} + U_{se2} - I_{s2}R_{s2} = I_{R1}R_1, \\ I_{R1} = I_{s1} + I_{s2}, \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_1 为合闸后两机所共同带的负载, $R_1 = R_{11} // R_{12}$; I_{R1} 为流过共同负载的电流。

系统中励磁绕组部分电路方程为:

$$\begin{cases} U_{fe1} + U_{f1} + I_{f1}R_{f1} = U_{f1}, \\ U_{fe2} + U_{f2} + I_{f2}R_{f2} = U_{f2}. \end{cases} \quad (6)$$

系统中关于阻尼绕组的电路方程为^[10]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E} & 0 \\ 0 & \mathbf{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{i1} & 0 \\ 0 & z_{i2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} z_{a1} & 0 \\ 0 & z_{a2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{d2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{E} 为单位矩阵。

1.3 并列系统模型中网格剖分与定、转子相对运动的处理

采用一阶线性三角形单元对 2 台实验电机截面进行剖分。实验电机为 2 kW, 2 极单相同步发电机, 定子槽数为 30, 定子铁芯长 110 mm, 最小气隙长度为 0.5 mm, 极弧系数为 0.698 5。有限元网格剖分图见图 3。单相同步发电机并列系统模型的剖分单元数为 33 136, 节点数为 16 568。

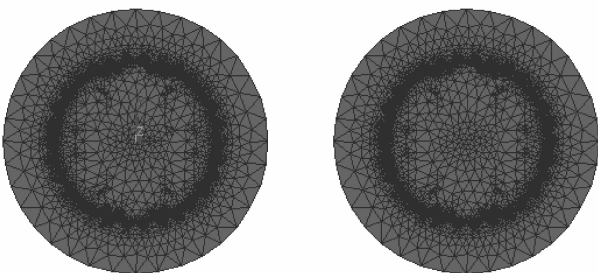


图 3 发电机并列系统网格剖分图

定、转子间相对运动的处理采用在运动边

界^[11-13]上通过有限元形函数耦合定、转子磁场的方法。

在单相同步发电机并列系统模型中, 2 台发电机的转轴中心具有不同的坐标, 仿真计算时需实现 2 台发电机转子绕各自的转轴中心转动, 并且在转动的每一位置实现转子网格与定子网格的耦合。笔者用 APDL 语言编制了仿真程序, 能实现 2 台发电机转子绕各自的转轴中心转动, 模拟 2 台发电机同时转动的情况, 并且在转动的每一位置实现转子网格与定子网格的耦合。图 4 为计算 2 台单相同步发电机并列暂态过程的仿真程序流程图。

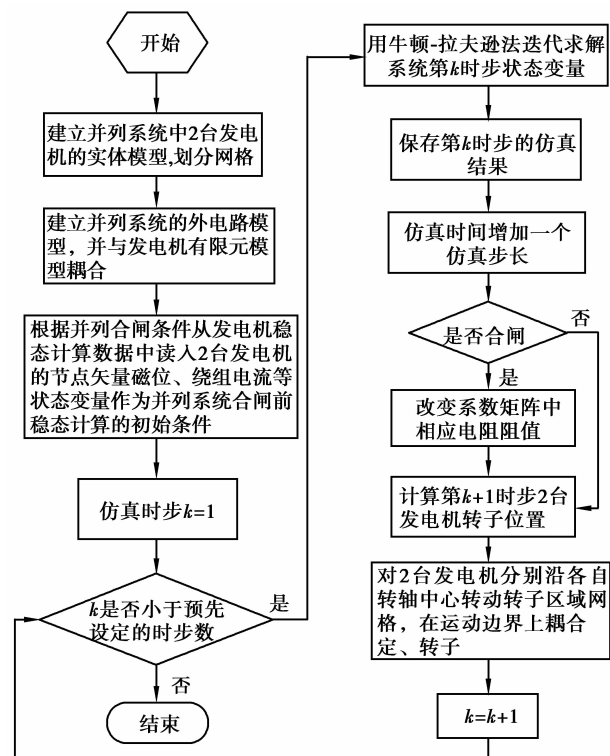


图 4 单相同步发电机并列系统仿真流程图

2 单相同步发电机并列冲击电流

单相同步发电机并列合闸后的冲击电流与合闸时 2 台发电机间的频率差值、电压差值和相位差值有关^[14-15], 笔者用所建立的单相同步发电机并列系统模型对 2 台实验电机在不同并列参数差值下并列的暂态过程进行了仿真计算, 得出在 3 个并列参数差值单因素及多因素作用下合闸后冲击电流的大小和变化规律, 为单相同步发电机并列控制器设计提供了并列参数差值整定依据。

单相同步发电机并列系统模型中的 2 台发电机, 仿真计算时设定发电机 1 为主发电机, 代表先运

行的发电机,发电机2为从发电机,代表待并列发电机。

针对部队需要,单相同步发电机并列控制器应完成:在一台单相同步发电机负载达到满载时,自动启动另一台单相同步发电机投入并列。也就是主发电机满载时,从发电机空载并入的并列过程,笔者的仿真研究也针对这种情况进行。

2.1 频率差值不同时的冲击电流

笔者以冲击电流表示冲击电流的峰值,额定电流表示额定电流的幅值。仿真计算时,根据实验电机的实际情况并参照三相同步发电机的并网条件,频率差设定了3个值:0.25,0.2,0.1 Hz。在每一个频率差值下,2台发电机电压差从0 V开始,每变化5.5 V计算一次,一直到电压差为99 V;2台发电机的相位差从 0° 开始,每变化 3.6° 计算一次,一直到相位差为 54° ,计算出不同并列参数差值下合闸后系统中的冲击电流。把不同频率差下合闸后冲击电流随电压差及相位差变化的曲面图中冲击电流等于某一给定值的等势面向下投影,得到图5为不同频率差下合闸后冲击电流小于各个给定值时的电压差及相位差取值范围。单相同步发电机并列后冲击电流不应超过发电机额定电流的100%,图6为频率差为0.25 Hz时合闸后冲击电流不大于发电机额定电流时的电压差及相位差取值范围。

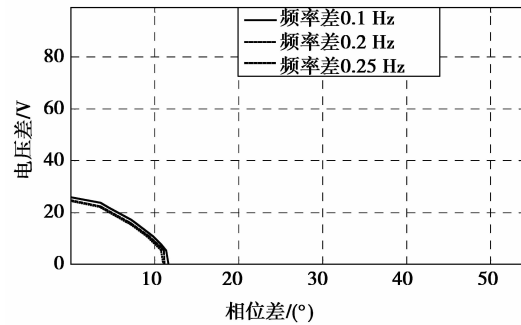
1)从图5可以看出,频率差越大时,合闸后冲击电流小于给定值的电压差和相位差取值范围越小,因此,确定单相同步发电机的并列参数差值允许范围时,应采用在频率差较大时计算得到的电压差和相位差取值范围。同时,也可以看出,频率差从0.25 Hz变化到0.10 Hz时,合闸后冲击电流小于给定值的电压差和相位差取值范围差别不大。

2)从图6可以看出,在频率差为0.25 Hz时,合闸后冲击电流小于发电机额定电流的电压差和相位差取值范围:当相位差为 0° ,仅存在电压差时,电压差可取的最大值为额定电压的30%;当电压差为0,仅存在相位差时,相位差可取的最大值为 27° ;当电压差和相位差同时存在时,随着相位差增大,电压差取值减小,同样,随电压差增大,相位差取值也减小。

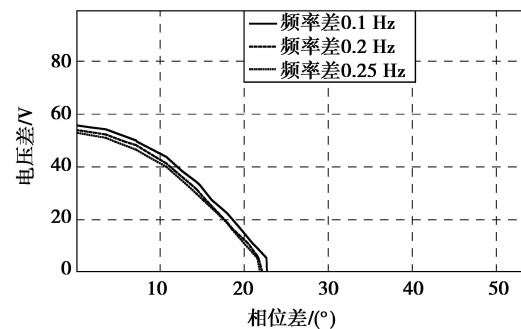
当相位差从 0° 增加到 10° 时,电压差的取值从额定电压的30%减小到25%;当相位差从 10° 增加到 20° 时,电压差取值从额定电压的25%减小到额定电压的10%;当相位差从 20° 增加到 27° 时,电压差取值从额定电压的10%减小到0。

2.2 主发电机频率不同时的冲击电流

实验电机带负载稳定运行时的频率变化在



(a) 冲击电流小于4.5 A



(b) 冲击电流小于9.8 A

图5 不同频率差下合闸后冲击电流小于给定值的电压差及相位差取值范围

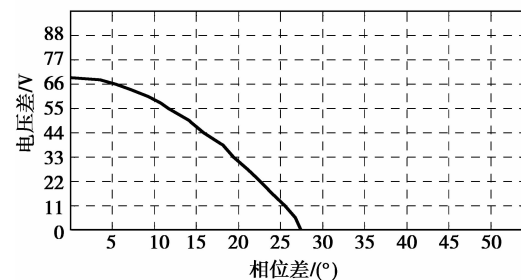


图6 频率差为0.25 Hz时合闸后冲击电流不大于发电机额定电流的电压差及相位差取值范围

49.5~50.5 Hz之间,本小节计算了主发电机频率分别为49.5、50、50.5 Hz时,2台发电机频率差为0.25 Hz,不同电压差和相位差下合闸后系统中的冲击电流。

图7为主发电机频率分别为49.5、50、50.5 Hz,2台发电机频率差为0.25 Hz时合闸后冲击电流不大于发电机额定电流时的电压差及相位差取值范围。

从图7可以看出,在频率差值一定时,并列前主发电机的频率高低对单相同步发电机允许并列的并

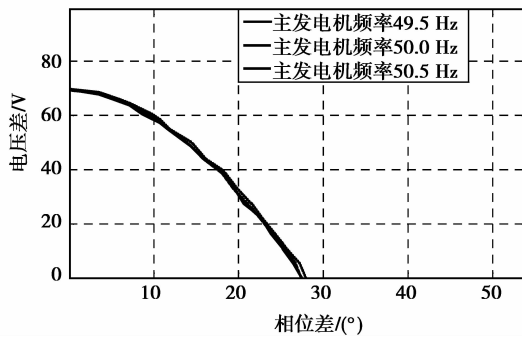


图 7 频率差为 0.25 Hz 时合闸后冲击电流不大于发电机额定电流时的电压差及相位差取值范围 (主发电机频率分别为 49.5, 50.0, 50.5 Hz)

列参数差值范围影响不大。

2.3 主发电机电压不同时的冲击电流

实验电机带负载稳定运行时的电压变化在 200~220 V 之间,本小节计算了主发电机电压分别为 200, 210, 220 V 时,2 台发电机频率差为 0.25 Hz,不同电压差和相位差下合闸后系统中的冲击电流。

图 8 为主发电机电压分别为 200, 210, 220 V, 2 台发电机频率差为 0.25 Hz 时合闸后冲击电流不大于发电机额定电流时的电压差及相位差取值范围。

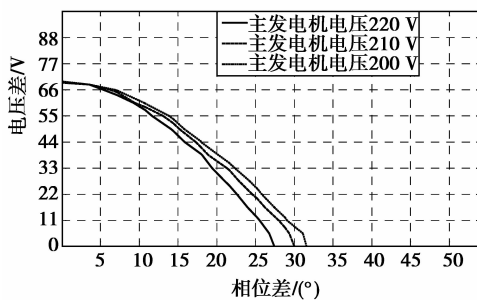


图 8 频率差为 0.25 Hz 时合闸后冲击电流不大于发电机额定电流时的电压差及相位差取值范围

从图 8 可以看出,在相同频率差下,并列时主发电机电压越低,可以并列的相位差最大值越大,可以并列的区域也越大,但可以并列的电压差最大值没有增加。因此,2 台单相同步发电机并列时,允许并列的并列参数差值范围应以主发电机电压较高时计算所得的允许并列的并列参数差值范围为准,若并列时主发电机电压较低,也能满足冲击电流不大于发电机额定电流的要求。

3 实验验证

以仿真得到的 2 台实验电机的允许并列的并列参数差值范围为依据,采用单相同步发电机并列控制器对 2 台实验电机进行大量并列实验,以验证仿真得到的并列条件。

实验时发电机 1 先启动,带额定负载运行,再启动发电机 2,并列控制器自动调节 2 台发电机的电压和转速,在 2 台发电机的并列参数差值小于预先设定的并列参数差值时合闸。表 1 为在各种并列条件下实验所得冲击电流最大值和进入稳态的时间(过程时间)。

表 1 各种并列条件下实验数据

频率差 /Hz	电压差 /%	相位差 /($^{\circ}$)	最大冲击电流/A	过程时间/s
0.25	30	5	12.6	4.6
0.25	25	10	11.9	6.1
0.25	20	15	11.9	8.5
0.25	10	20	11.6	8.4
0.25	5	25	11.2	9.4
0.10	30	5	12.5	1.5
0.10	25	10	12.2	1.5
0.10	20	15	12.3	1.9
0.10	10	20	11.7	2.5
0.10	5	25	11.6	3.2

从实验结果可以看出:

1) 2 台实验电机在每组并列条件下进行多次并列实验,所测得的冲击电流都没有超过发电机的额定电流,说明仿真计算得出的并列参数差值允许范围准确性好,用仿真得到的并列条件能较准确地控制合闸后系统中的冲击电流。

2) 在允许并列的并列参数差值范围内,2 台实验电机都能很快并列成功,说明单相同步发电机并列控制器设计时,允许并列的并列参数差值范围的确定以合闸后冲击电流不超过发电机额定电流为标是正确可行的。

3) 从实验记录中的过程时间值一栏可以看出,在相同频率差条件下,当电压差值整定较大而相位差值整定较小时,从合闸到稳定的时间较短,当电压差值整定较小而相位差值整定较大时,从合闸到稳定的时间较长。在电压差值和相位差值一定的情况

下,减小频率差的整定值能较大程度减小从合闸到稳定的时间。

4 结 论

2台单相同步发电机并列时冲击电流的大小主要由并列时的电压差和相位差综合决定,与并列时频率差的关系较小。在仿真计算的频率差值条件下,对应于一个给定的冲击电流值,相位差取得越大,电压差应取得越小,同样,电压差取得越大,相位差应取得越小。

在仿真计算的频率差值条件下,并列时主发电机的频率高低不影响计算所得的允许并列的并列参数差值范围;并列时主发电机电压越低,可以并列的相位差最大值越大,可以并列的区域也越大,但可以并列的电压差最大值没有增加。

2台实验电机并列时,在频率差为0.25 Hz及以下时,合闸后冲击电流小于发电机额定电流的电压差和相位差:当相位差限制为 5° 时,电压差的取值应限制在额定电压的30%以内;当相位差限制为 10° 时,电压差的取值应限制在额定电压的25%以内;当相位差限制为 15° 时,电压差的取值应限制在额定电压的20%以内;当相位差限制为 20° 时,电压差的取值应限制在额定电压的10%以内;当相位差限制为 25° 时,电压差的取值应限制在额定电压的5%以内。

参考文献:

- [1] 黄国治,傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 高景德,王祥珩,李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2005.
- [3] THORBURN K, KARLSSON K E, WOLFBRANDT A, et al. Time stepping finite element analysis of a variable speed synchronous generator with rectifier[J]. Applied Energy, 2006, 83(4): 371-386.
- [4] RASMENI S W, KAMPER M J, FICK P D, et al. Finite element based simulation of the current waveform of the switched reluctance machine[C]//The 6th African Conference in Africa, October 2-4, 2002, George, South Africa. [S. l.]: IEEE, [2003-01-14]: 681-683.
- [5] KANERVA S, SEMAN S, ARKKIO A. Inductance model for coupling finite element analysis with circuit simulation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1620-1623.
- [6] KANERVA S. Simulation of electrical machines, circuits and control systems using finite element method and system simulator [D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2005.
- [7] KANERVA S, KAUKONEN J, SZUCS á, et al. Coupled FEM-control simulation in the analysis of electrical machines and converters [C]//12th International Power Electronic and Motion Control Conference, August 30-September 1, 2006, Portoroz, Slovenia. [S. l.]: IEEE, [2009]: 1925-1930.
- [8] FU W N, HO S L. Enhanced nonlinear algorithm for the transient analysis of magnetic field and electric circuit coupled problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(2): 701-706.
- [9] POPESCU M, MILLER T J E, MCGILP M, et al. Asynchronous performance analysis of a single-phase capacitor-start, capacitor-run permanent magnet motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(1): 142-149.
- [10] 杨静, 王维俊, 江渝, 等. 小型单相同步发电机阻尼绕组作用分析[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(3): 269-272.
YANG JING, WANG WEI-JUN, JIANG YU, et al. Damper winding in small single phase synchronous generators[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3): 269-272.
- [11] KIM C E, SYKULSKI J K. Harmonic analysis of output voltage in synchronous generator using finite-element method taking account of the movement [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 1249-1252.
- [12] DEAS D, KUO-PENG P, SADOWSKI N, et al. 2-D FEM modeling of the tubular linear induction motor taking into account the movement [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 1165-1168.
- [13] OLIVEIRA A M, KUO-PENG P, SADOWSKI N, et al. A non-a priori approach to analyze electrical machines modeled by FEM connected to static converters[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 933-936.
- [14] WANG X J, CHAI J Y, WANG Z J. Research on parallel operation characteristics of variable frequency synchronous-motor-generator (SMG) [J]. The Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, September 27-29, 2005, Nanjing, China, [S. l.]: IEEE, [2006-01-16]: 72-75.
- [15] OKUNO H, KAWAKITA M. Delayed feedback control of three-synchronous-generator infinite-bus system[J]. Electrical Engineering in Japan, 2006, 156(1): 7-12.