

基于隐式梯形-时步保持法的 3/12 相电机建模

纪锋, 付立军, 王公宝, 王刚

(舰船综合电力技术国防科技重点实验室(海军工程大学), 湖北省 武汉市 430033)

Modeling of 3/12-phase Generator Using Implicit Trapezoidal & Time-step-holding Method

Ji Feng, Fu Lijun, Wang Gongbao, Wang Gang

(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology (Naval University of Engineering),

Wuhan 430033, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The integrated power system (IPS) contains special, high-order and non-linear components like 3/12-phase double winding generators. These components' simulation models are not offered by any power system electromagnetic transient simulation software. To model the double winding generators, the implicit trapezoidal method was applied to transfer the double winding generator's mathematical model into difference equations. By using the stator-rotor-separate iteration method, the generator's equivalent circuit model was derived. Then, the simulation model of double winding generators was built in PSCAD. During the modeling, the time-step-holding method was introduced to divide the model's simulation steps into computation steps and holding steps. In this way, the calculating speed was increased. Finally, the test bed of integrated electric propulsion system was constructed. The experiments on no-load short-circuit of the generator and on the speeding of the propulsion system were carried out and the same events were then simulated. The comparison between experimental and simulative results shows the availability of the modeling method and the correctness of the 3/12-phase double winding generator model. The study shows that the modeling method introduced in this paper can be used to build the simulation model of double winding generators accurately and efficiently. It can be applied to other EMTP-kind simulation software, and can be used for modeling of other multi-phase machines in IPS.

KEY WORDS: integrated power system (IPS); implicit trapezoidal method; time-step-holding method; double winding generator; simulation model

摘要: 综合电力系统(integrated power system, IPS)包含 3/12 相双绕组发电机等特殊高阶非线性元件, 现有电力系统电磁暂态仿真软件均不提供其仿真模型。为此, 采用隐式梯形法对双绕组发电机数学模型进行差分离散化处理, 通过定、转子分离迭代, 推导出电机等效电路模型, 并在 PSCAD 中建立双绕组发电机仿真模型。应用时步保持算法, 将模型的仿真时步划分为计算时步和保持时步, 提高了计算速度。最后, 构建综合电力推进系统试验平台, 发电机空载短路、推进系统调速的试验与仿真结果吻合, 验证了建模方法的有效性和所建模型的正确性。研究表明, 基于隐式梯形-时步保持算法的建模方法能够准确高效地建立双绕组发电机的仿真模型, 可应用于 EMTP 类仿真软件, 并可推广至 IPS 各类多相电机建模。

关键词: 综合电力系统; 隐式梯形法; 时步保持算法; 双绕组发电机; 仿真模型

0 引言

舰船综合电力系统(integrated power system, IPS)是一种新型的动力系统, 它是将舰船原动机能量完全转化为电能, 同时提供推进用电、高能耗用电和全船其他负载用电的电能综合利用与统一管理系统^[1]。考虑到安全性、经济性和可重复性等方面的要求, 采用数字仿真的手段对综合电力系统进行设计和研究具有独特的优势。

IPS 包含的诸多特种元件在现有商业软件中没有直接对应的模型, 需要自行建立。以 3/12 相双绕组发电机为例, 该发电机具有 1 套交流绕组和 4 套整流绕组, 能够同时输出三相交流电和直流电, 无需增设辅助设备, 具有结构简单、设备成本低、可靠性高等优点, 可以明显提高 IPS 等高度集成化独立电力系统的供电品质, 减小交流电压波形畸变,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977090, 51077130)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50977090,51077130).

改善交流电网电磁兼容性能, 满足舰船电力系统对发电设备的严格要求, 因此具有广泛的应用前景^[2-5]。但是在双绕组电机的数学模型中, 定子绕组为 12 阶, 转子绕组为 4 阶, 考虑多阻尼绕组时阶数更高, 现有仿真软件均不提供该电机模型, 而单纯用 3 相电机组合成 3/12 相双绕组电机则无法计及绕组间的电磁耦合, 势必降低仿真精度。

文献[6]在 Simulink 中建立了基于 S 函数和受控源模块的双绕组电机仿真电路模型^[7], 但是因为整流绕组侧需要外接大量电力电子器件, Simulink 对此处理速度较慢, 从而限制其应用范围, 此外, 该建模方法需要调用 Matlab 的微分方程求解函数, 无法直接推广至其他电力系统电磁暂态仿真软件。

针对上述问题, 本文采用隐式梯形法将双绕组发电机的数学模型从微分方程组转化为差分迭代方程组, 在 PSCAD/EMTDC 中建立发电机的仿真模型。考虑到 IPS 属于典型刚性系统, 全系统的数值计算需要减小仿真步长, 而发电机模型阶数较高, 减小步长将导致计算量增加, 降低系统仿真速度。本文将时步保持算法应用于发电机建模过程中, 将发电机模型的仿真时步划分为计算时步和保持时步, 实现 IPS 的多步长仿真, 减小了计算量, 提高了仿真速度。实验结果表明: 该建模方法其具有充分的运算精度, 并能显著提高 IPS 仿真速度。该方法能够推广应用于所有 EMTP 类软件, 为 IPS 设计研究提供了有力的仿真手段。

1 双绕组同步发电机建模

1.1 双绕组同步发电机原理

双绕组电机原理如图 1 所示。电机定子上有 2 套绕组: 一套是 3 相绕组, 提供交流电, 称为交流绕组; 另一套是 12 相 4Y 移 15° 绕组, 经桥式整流后输出直流电, 称为直流绕组或整流绕组。2 套绕组相互绝缘, 没有电路连接, 只有磁路耦合。2 套

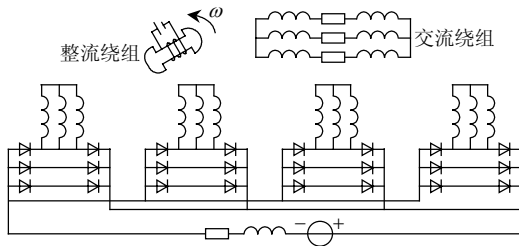


图 1 双绕组同步发电机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of double winding generator

绕组共用 1 个转子, 转子上除了布置有与普通三相交流电机一样的励磁绕组 f_d 、直轴阻尼绕组 k_d 和交轴阻尼绕组 k_q 外, 还有一套 q 轴绕组 f_q 以改善系统稳定性^[8]。

1.2 双绕组同步发电机数学模型

采用 $d-q-0$ 坐标系统理想电机模型, 得到 3/12 相双绕组电机的磁链和电压方程^[8-10]:

$$\psi_{dq} = X_{dq} i_{dq} \tag{1}$$

$$u_{dq} = d\psi_{dq}/dt + A\psi_{dq}d\theta/dt + R_{dq}i_{dq} \tag{2}$$

式中: $\psi_{dq} = [\psi_{d1} \ \psi_{q1} \ \psi_{d2} \ \psi_{q2} \ \psi_{d3} \ \psi_{q3} \ \psi_{d4} \ \psi_{q4} \ \psi_{dA} \ \psi_{qA} \ \psi_{fd} \ \psi_{kd} \ \psi_{fq} \ \psi_{kq}]^T$, 为磁链向量; $U_{dq} = [u_{d1} \ u_{q1} \ u_{d2} \ u_{q2} \ u_{d3} \ u_{q3} \ u_{d4} \ u_{q4} \ u_{dA} \ u_{qA} \ u_{fd} \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 为电压向量; $i_{dq} = [i_{d1} \ i_{q1} \ i_{d2} \ i_{q2} \ i_{d3} \ i_{q3} \ i_{d4} \ i_{q4} \ i_{dA} \ i_{qA} \ i_{fd} \ i_{kd} \ i_{fq} \ i_{kq}]^T$, 为电流向量; $R_{dq} = \text{diag}(R_y \ R_y \ R_y \ R_y \ R_y \ R_y \ R_y \ R_y \ R_A \ R_A \ R_{fd} \ R_{kd} \ R_{fq} \ R_{kq})$, 为电阻矩阵; $A = \text{diag}(A_{11} \ A_{22} \ A_{33} \ A_{44} \ A_{AA} \ 0)$, 为转换矩阵,

0 为 4×4 的零矩阵, $A_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $i = 1, 2, 3, 4, A$;

$$X_{dq} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{1A} & X_{1r} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} & X_{2A} & X_{2r} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} & X_{3A} & X_{3r} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} & X_{4A} & X_{4r} \\ X_{A1} & X_{A2} & X_{A3} & X_{A4} & X_{AA} & X_{Ar} \\ X_{r1} & X_{r2} & X_{r3} & X_{r4} & X_{rA} & X_{rr} \end{bmatrix} \text{ 为感抗}$$

矩阵, $X_{ii} = \text{diag}(X_{dy} \ X_{qy})$, $X_{AA} = \text{diag}(X_{dA} \ X_{qA})$,

$$X_{12} = X_{23} = X_{34} = X_{14} = \begin{bmatrix} X_{dm1} & X_{dqm1} \\ -X_{dqm1} & X_{qm1} \end{bmatrix}, X_{13} = X_{24} =$$

$$\begin{bmatrix} X_{dm2} & X_{dqm2} \\ -X_{dqm2} & X_{qm2} \end{bmatrix}, X_{1A} = \begin{bmatrix} X_{dmAi} & X_{dqmAi} \\ -X_{dqmAi} & X_{qmAi} \end{bmatrix}, X_{1r} =$$

$$\begin{bmatrix} X_{afd} & X_{akd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{afq} & X_{akq} \end{bmatrix}, X_{Ar} = \begin{bmatrix} X_{Afd} & X_{Akd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{Afq} & X_{Aqk} \end{bmatrix},$$

$X_{ji} = X_{ij}^T$, $X_{Ai} = X_{iA}^T$, $X_{ri} = X_{ir}^T$, $X_{rA} = X_{Ar}^T$, $i, j = 1, 2, 3, 4$, 表示第 1~4 套整流绕组, A 表示交流绕组, m 表示互感^[11-14]。

1.3 仿真模型

为了在仿真中解算 3/12 相双绕组同步发电机的数学模型, 需对式(1)、(2)差分离散化, 将发电机各相支路等效为电阻等值电路, 实现与 EMTDC 的互连。为此, 将式(1)代入式(2), 其中整流绕组各量均取折算后的标么值, 并且在研究同步发电机电磁暂态时, 忽略原动机转速变化, 认为同步电机转子

转速 $\omega = 1$ pu, 有

$$\mathbf{u}_{dq} = \mathbf{X}_{dq} \mathbf{d}i_{dq}/dt + \mathbf{R}_e \mathbf{i}_{dq} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{R}_e = \mathbf{R}_{dq} + \mathbf{A}\mathbf{X}_{dq}$ 。对方程(3)应用隐式梯形法差分离散^[15-17]后得

$$\mathbf{u}_{dq}(t) = \mathbf{R}_{fw} \mathbf{i}_{dq}(t) + \mathbf{R}_{ba} \mathbf{i}_{dq}(t - \Delta t) - \mathbf{u}_{dq}(t - \Delta t) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}_{fw} = \mathbf{R}_e + 2\mathbf{X}_{dq}/\Delta t$; $\mathbf{R}_{ba} = \mathbf{R}_e - 2\mathbf{X}_{dq}/\Delta t$ 。

对式(4)按定、转子分别迭代, 最后可得定子电流迭代公式:

$$\mathbf{i}_s(t) = \mathbf{G}_{s1} \mathbf{u}_s(t) + \mathbf{G}_{s2} \mathbf{i}_s(t) + \mathbf{G}_{s3} \mathbf{i}_s(t - \Delta t) + \mathbf{G}_{s4} \mathbf{i}_s(t - \Delta t) + \mathbf{G}_{s5} \mathbf{u}_s(t - \Delta t) + \mathbf{G}_{s6} \mathbf{u}_r(t) + \mathbf{G}_{s6} \mathbf{u}_r(t - \Delta t) \quad (5)$$

式中 \mathbf{G}_{s1} 为常数对角矩阵, 从而意味着电机仿真模型中 d 、 q 绕组解耦, 且具有相同的常数等值计算电阻。对式(5)进行坐标变换, 得到 a-b-c 坐标系统下的迭代方程:

$$\mathbf{i}_{abc}(t) = \mathbf{G}_{eq} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{i}_{hist}(t) \quad (6)$$

式(6)表明, 3/12 相双绕组同步发电机模型被等效为 5 套 3 相绕组, 每套绕组的 3 相支路都可等效为导纳并联历史电流源的形式, 如图 2 所示, 并且绕组之间相互解耦, 从而方便实现与外部网络的接口。根据式(6)和图 2, 利用 PSCAD 的自定义模块功能, 即可建立发电机的仿真模型。

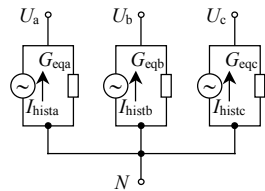


图 2 一套 3 相绕组等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of one three-phase winding

2 时步保持算法的应用

2.1 算法原理

IPS 是典型的刚性系统, 包含大量非线性高阶元件, 为了保证全系统数值计算收敛, 需要适当减小仿真步长, 从而导致阶数较高的双绕组发电机模型计算量增加, 降低了系统仿真速度。针对此问题, 在建模过程中引入时步保持算法。

时步保持算法基于零阶采样保持原理。对于正弦信号 $y(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$, 以采样频率 f_s 对其进行采样, 即采样周期 $T_s = 1/f_s$, 每次采样周期内对采样信号零阶保持, 则采样后信号为

$$y_s(t) = A \sin(\omega k T_s + \varphi)$$

$$k T_s \leq t < (k+1) T_s, \quad k=0,1,2,\dots$$

按照此原理, 对双绕组发电机仿真模型中的各物理量适时进行采样保持, 将模型仿真时步划分为计算时步和保持时步, 即等效于延长模型实际仿真步长, 从而减少系统计算工作量, 提高仿真速度。

2.2 算法实现流程

仿真过程如图 3 所示。设系统仿真步长为 T_1 , 双绕组发电机仿真步长 $T_2 = n T_1$, 在发电机模块主语句段中增添条件判断语句, 当仿真时间 t 满足 $t = k T_1 = n k T_2 (k=0,1,2,\dots)$ 时运行主程序语句, 求取发电机等值电路参数并参与全系统计算, 然后将等值电路数据保存至存储单元; 当 $k T_1 < t < (k+1) T_1$ 时, 读取存储单元数据形成与 $t = k T_1$ 时相同的等值网络, 参与全系统计算。

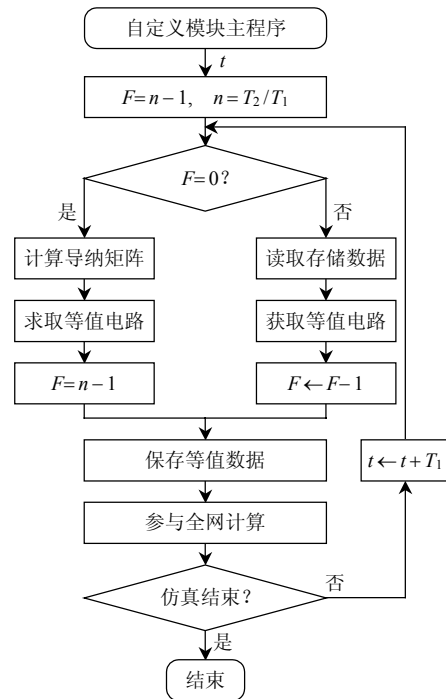


图 3 算法逻辑图

Fig. 3 Logical diagram of the method

3 综合电力推进系统试验与仿真

3.1 试验系统结构

用于模拟舰船综合电力推进系统的交直流电力集成双绕组发电机试验研究平台如图 4 所示。

其中双绕组同步发电机额定转速为 1500 r/min, 交流侧额定电压为 390 V, 功率因数为 0.8(滞后), 频率为 50 Hz, 12 相整流输出直流电压为 235~

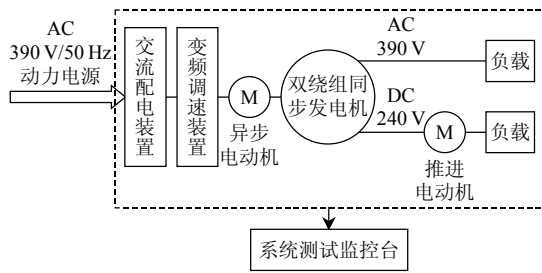


图4 双绕组同步发电机试验平台

Fig. 4 Test bed of double winding generator

251 V; 采用直流电动机模拟直流推进电动机, 通过调节励磁实现转速控制, 额定电压为 520 V, 额定电枢电流为 65.4 A; 直流侧负载采用双馈电机带纯电阻的形式, 为简化处理, 双馈电机转子两相间加直流恒定励磁, 作发电机, 带 3 相对称电阻负载, 星形连接, 每相电阻为 4.5 Ω; 交流侧接 3 相星形对称负载, 每相电阻为 4.5 Ω。

3.2 试验与仿真结果对比

试验系统的仿真模型如图 5 所示。其中双绕组发电机模型采用仿真时步保持算法在 EMTDC 中建立, 实际仿真步长可由模型输入参数控制。

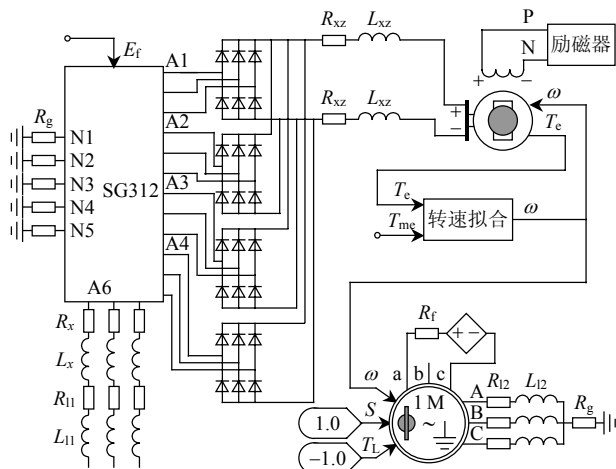
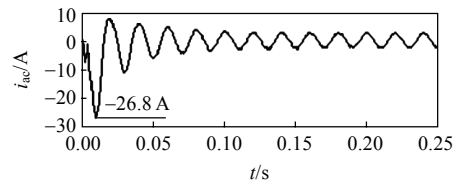


图5 试验系统仿真模型

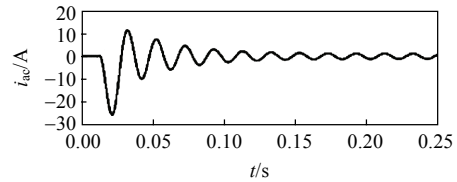
Fig. 5 Simulation model of experiment system

为测试所建模型的正确性, 取最严重工况, 即双绕组发电机交直流同时短路^[18-20], 出于安全考虑, 试验仅在降压条件下进行, 发电机空载, 交流侧电压为 60 V, 稳态时突然短路, 交流绕组单相和整流绕组直流输出侧短路电流试验、仿真波形分别如图 6、7 所示, 仿真步长取 10 μs。

交流侧线电压分别为 60、70 和 80 V 时发电机交流绕组最大短路电流和整流绕组输出直流最大短路电流的试验测量值、仿真值如表 1 所示。

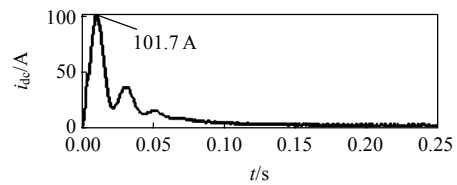


(a) 试验波形

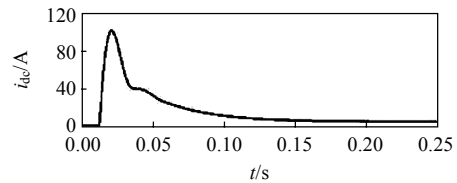


(b) 仿真波形

图6 交直流同时短路时的交流短路电流波形
Fig. 6 AC current under AC-DC short circuit



(a) 试验波形



(b) 仿真波形

图7 交直流同时短路时的直流短路电流波形
Fig. 7 DC current under AC-DC short-circuit

表1 交直流同时短路时的电流最大值

Tab. 1 Maximum AC-DC short-circuit current

U _{ab} /V	U _{dc} /V	交流侧最大短路电流			直流侧最大短路电流		
		实测值/A	仿真值/A	误差/%	实测值/A	仿真值/A	误差/%
60	38.5	26.8	26.0	2.99	101.7	101.0	0.69
70	44.8	31.6	30.3	4.11	122.0	117.8	3.44
80	51.3	32.6	34.7	6.44	136.1	134.7	1.03

3 组对比中, 仿真与试验的短路电流误差均小于工程计算 10% 的容限, 证明所建模型是正确的。

在试验平台模拟推进电机减速运行试验, 双绕组发电机交流绕组输出电压维持在 388 V, 提高直流电动机励磁电流, 使其转速从额定值 1 500 r/min 降低至 650 r/min。仿真系统中仿真步长取 10 μs, 双绕组电机实际仿真时步分别取 10、50 和 100 μs, 其中取 10 和 100 μs 时推进电机电枢电流波形如图 8 所示, 电机转速波形如图 9 所示。

对比试验和双绕组电机模型采用不同步长时

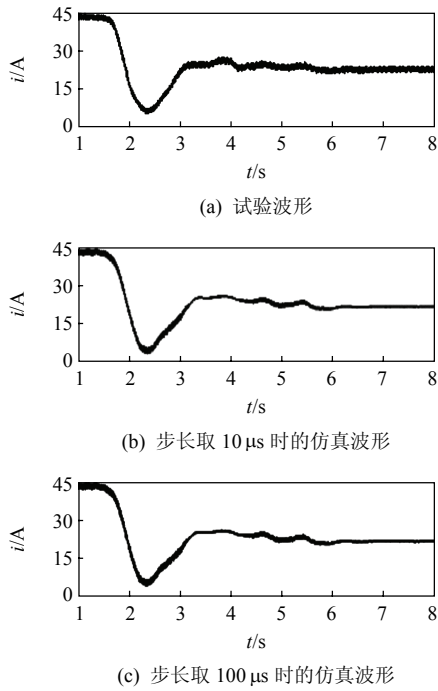


图 8 直流电动机电枢电流波形
Fig. 8 Armature current of DC motor

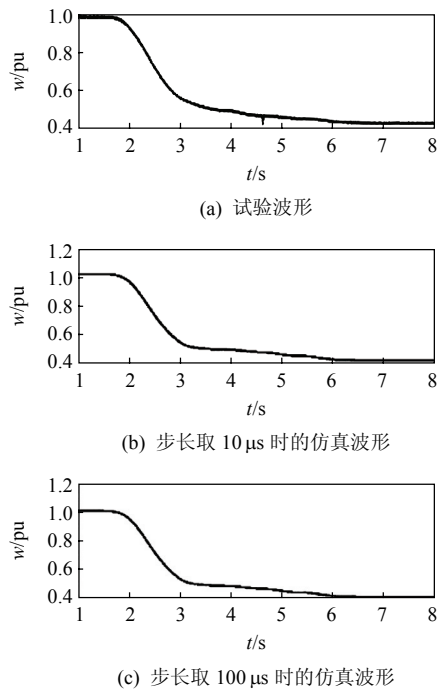


图 9 电动机转速波形
Fig. 9 Rotor speed of DC motor

的仿真波形可以发现，尽管双绕组电机采用了 10、50 和 100 μs 3 种不同步长，但是推进电机和负载的各数据波形相差不多，对系统分析的影响可以忽略，仿真结果和试验结果相吻合，证明所建模型正确，建模方法有效可行。

双绕组电机模型不同步长对应的仿真时间如表 2 所示，可见选取 50 μs 步长能够节省近 1/4 的仿真时间，从而显著提高仿真速度。对比还发现，取 100 μs 步长和 50 μs 步长时所耗用的仿真时间相差不多，因此再继续增大双绕组电机模型的仿真步长并不能有效减少全系统仿真时间。

表 2 不同步长对应的仿真时间
Tab. 2 Simulation time with different time steps

仿真步长/μs	仿真时间/s	节省时间/%
10	316.9	0.0
20	284.3	10.3
50	246.0	22.4
100	241.1	23.9

对上述现象进行定性解释，设自定义模型正常运行一个系统步长所用时间为 x_1 ，而在一个系统步长中只进行数据存储和读取所用时间为 x_2 ，模型等效步长与系统步长之比为 n ，则一般仿真和采用时步保持算法仿真时自定义模型所耗用实际时间之比为

$$R_{NH} = \frac{nx_1}{x_1 + (n-1)x_2} = \frac{\frac{x_1}{x_2}}{1 + \frac{x_2}{n} - 1} \quad (7)$$

分别取 x_1/x_2 的值为 1、1.2、1.5、2、3，随 n 的取值不同， R_{NH} 变化曲线如图 10 所示。

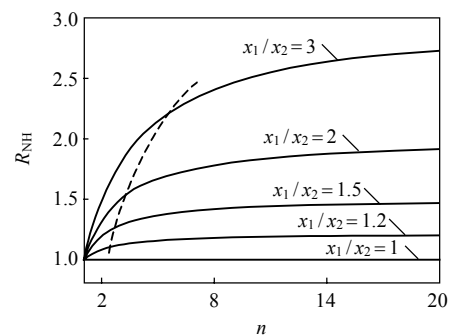


图 10 R_{NH} 随 n 变化的曲线
Fig. 10 R_{NH} - n curve

从图 10 可以看出， n 较小时 R_{NH} 相对 n 的变化率 dR_{NH}/dn 较大，随着 n 不断增大， dR_{NH}/dn 不断减小，最后趋近于 0，这与上述仿真结果是一致的。该结果表明：当 n 从 1 开始增大时，系统仿真时间明显减小，而当 n 达到一定阈值时，再提高 n 的值对减小仿真时间的作用并不明显，相反由于步长增

大而引起的误差也将不断增大。因此,综合考虑仿真速度和仿真精度, n 的取值不应太大,可参考图10在曲线拐点(图中曲线与虚线交点)附近选值,以获得较好的仿真效果。在实际工程应用中,由于难以确定准确分析模型计算的工作量,即难以确定式(7)中 x_1 和 x_2 的比例关系,故一般依靠经验估计确定 n 的取值范围。当系统仿真步长取 $10\mu\text{s}$ 时,推荐选取 $n=4$ 或 5 。

4 结论

对IPS进行仿真研究时不可避免地需要对以3/12相双绕组发电机为代表的特殊元件进行建模。采用隐式梯形法将发电机数学模型中的微分方程组转换为差分方程组,结合定、转子分离迭代方法,即可在PSCAD/EMTDC中建立双绕组发电机的仿真模型。

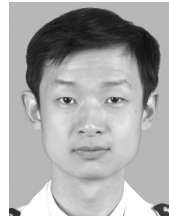
在建立仿真模型的过程中引入时步保持算法,则可使元件模型的实际仿真步长延长到系统仿真步长的整数倍,从而在保证计算精度的同时有效减少仿真时间,为不断复杂化的IPS暂态仿真提供有力的技术支持。

试验与仿真对比结果表明,以隐式梯形法为基础,结合时步保持算法,能够准确高效地建立双绕组发电机的仿真模型。该建模方法可以推广至其他EMTP类电力系统暂态仿真软件,可用于建立多相多套绕组特种电机的仿真模型。

参考文献

- [1] 马伟明. 舰船动力发展的方向: 综合电力系统[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(6): 1-5, 9.
Ma Weiming. Integrated power systems: trend of ship power development[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2002, 14(6): 1-5, 9(in Chinese).
- [2] 马伟明. 交直流电力集成技术[J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 53-59.
Ma Weiming. AC-DC power integration techniques[J]. Engineering Science, 2002, 4(12): 53-59(in Chinese).
- [3] 陈巨涛, 郭焱, 郑华耀. 船舶电力推进双三相永磁同步电机的数学模型和仿真[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 653-658.
Chen Jutao, Guo Yi, Zheng Huayao. Mathematical models and simulation of marine electric propulsion double 3-phase permanent magnet synchronous machine[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement): 653-658(in Chinese).
- [4] 吕飞, 周波, 魏佳丹. 基于双绕组电励磁双凸极电机的双冗余发电系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 21-25.
Lü Fei, Zhou Bo, Wei Jiadan. Two redundancy generator system based on dual-winding doubly salient electromagnetic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 21-25(in Chinese).
- [5] 陈淼, 罗伟. 舰船双绕组发电机综合控制装置的研究[J]. 船电技术, 2004(5): 23-25.
Chen Miao, Luo Wei. Study on integrated control equipment on generation with double winding[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2004(5): 23-25(in Chinese).
- [6] 孙俊忠, 姜海龙. 3/12相双绕组交直流发电机的电路模型[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(2): 13-16.
Sun Junzhong, Jiang Hailong. Circuit models of 3/12-phase double-winding AC-DC generators[J]. Electric Machines & Control Applications, 2006, 33(2): 13-16(in Chinese).
- [7] 范子超, 于庆广, 张晓明. 双定子绕组同步电机及其单绕组等效模型[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 2-8.
Fan Zichao, Yu Qingguang, Zhang Xiaoming. Synchronous motor with dual stator winding and its single winding equivalent model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 2-8(in Chinese).
- [8] Zhang Gaifan, Ma Weiming. Transient analysis of synchronous machines[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2001: 39-69.
- [9] 孙俊忠, 马伟明, 吴旭升, 等. 3/12相双绕组发电机数学模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 93-96, 131.
Sun Junzhong, Ma Weiming, Wu Xusheng, et al. Study on mathematical model of 3-&12-phase synchronous generators with AC and bridge rectified DC output[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 93-96, 131(in Chinese).
- [10] 张敬南, 丛望, 代科. 多相Y绕组同步电动机数学模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(7): 758-761.
Zhang Jingnan, Cong Wang, Dai Ke. Research on a mathematical model of a multi-phase Y-coil synchronous motor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(7): 758-761(in Chinese).
- [11] 吴旭升, 张俊洪, 王文初, 等. 双绕组交直流发电机参数模型研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2005, 29(4): 518-521.
Wu Xusheng, Zhang Junhong, Wang Wenchu, et al. Parameter model of double-winding AC-DC generators

- [J]. Journal of Wuhan University of Technology : Transportation Science & Engineering, 2005, 29(4): 518-521(in Chinese).
- [12] 吴旭升, 马伟明, 张盖凡. 交直流混合供电的多相电机稳态电抗的测定[J]. 电工技术学报, 2001, 16(3): 1-6. Wu Xusheng, Ma Weiming, Zhang Gaifan. Measurement of steady-state reactance of multi-phase synchronous machines with AC and DC output[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(3): 1-6(in Chinese).
- [13] 吴旭升, 马伟明, 孙俊忠, 等. 交直流混合供电的多相电机超瞬变电抗的测定[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 64-69. Wu Xusheng, Ma Weiming, Sun Junzhong, et al. Measurement of subtransient reactances of multi-phase machines with AC and DC output[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 64-69(in Chinese).
- [14] 吴旭升, 马伟明. 双绕组交直流发电机参数的局部辨识[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 135-140. Wu Xusheng, Ma Weiming. Parameters part identification of double-winding AC-DC generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 135-140(in Chinese).
- [15] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991: 293-294. Dommel H W. EMTP theory book[M]. Translated by Li Yongzhuang, Lin Jiming, Zeng Shaohua. Beijing: China Water Power Press, 1991: 293-294(in Chinese).
- [16] 付立军, 马伟明, 刘德志. 十二/三相感应发电机的数值仿真与试验[J]. 电工技术学报, 2005, 20(6): 6-10. Fu Lijun, Ma Weiming, Liu Dezhi. Digital simulation and experiment of 12/3 phase induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(6): 6-10(in Chinese).
- [17] 陈来军, 陈颖, 梅生伟, 等. 一种混合并行算法及其在多相交直流混合电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 39-45. Chen Laijun, Chen Ying, Mei Shengwei, et al. A hybrid parallel computation algorithm and its application to multi-phase hybrid AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 39-45(in Chinese).
- [18] 孙俊忠. 双绕组交直流发电机突然短路研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2002. Sun Junzhong. Study on sudden short circuits of double-winding AC-DC generators[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2002(in Chinese).
- [19] 孙俊忠, 马伟明, 宋振海. 双绕组交直流发电机直流侧突然短路分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 95-100. Sun Junzhong, Ma Weiming, Song Zhenhai. Analysis of sudden DC-side short circuit of double winding AC-DC generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 95-100(in Chinese).
- [20] 孙俊忠, 马伟明, 吴旭升, 等. 3/12 相双绕组发电机交直流同时突然短路研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 71-76. Sun Junzhong, Ma Weiming, Wu Xusheng, et al. Sudden simultaneous AC-&DC-side short circuits of 3-&12-phase synchronous generators with AC and bridge rectified DC output[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 71-76(in Chinese).



纪锋

收稿日期: 2011-04-26。

作者简介:

纪锋(1983), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统安全运行研究工作, jifeng.ips@gmail.com;

付立军(1967), 男, 博士, 教授, 主要从事舰船电力系统仿真研究工作;

王公宝(1962), 男, 博士, 教授, 主要从事应用数学、小波分析、神经网络及其在电力系统中的应用研究工作;

王刚(1970), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统分析与控制的研究工作。

(责任编辑 谷子)