

## SSN 算法在大型风电系统实时仿真中的应用

谭伟<sup>1</sup>, 邱华静<sup>2</sup>, 邹毅军<sup>2</sup>

(1. 青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266042; 2. 上海科梁信息工程有限公司, 上海 200233)

**摘要:** 受仿真机存储容量及 CPU 处理能力的限制, 其所能实时计算的电气节点数及存储容量都是有限的。随着电力系统建模日益复杂和完善, 或系统的节点数超出了实时仿真器单个核的处理能力或所需存储容量太大, 而给仿真器实时仿真大型电力系统带来了挑战。深入研究了结合状态空间和节点分析的仿真算法——State-Space Nodal (SSN) 算法, 将该算法应用到大型双馈风力发电系统, 并通过 RT-LAB 实时仿真平台进行了仿真研究。仿真结果验证了 SSN 算法在实时化仿真多开关器件、大型电力系统的必要性和有效性。

**关键词:** SSN; 实时仿真; 风力发电; RT-LAB

### Application of SSN algorithm in large wind power system real-time simulation

TAN Wei<sup>1</sup>, QIU Hua-jing<sup>2</sup>, ZOU Yi-jun<sup>2</sup>

(1. College of Automation & Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. Shanghai Keliang Information Engineering Co., Ltd, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Simulator's real-time calculation of the electrical nodes and storage capacity is limited by its hardware constraints. With the increasingly complex modeling of power system, when the electrical nodes are beyond the processing capacity of single core of real-time simulator or need a large storage capacity, the simulator will face a big challenge in simulating large power systems in real time. State-Space Nodal (SSN) method, a simulation method that combines state-space with nodal analysis, is applied to the large double-fed wind power generation system and simulated using RT-LAB. Simulation results verify the proposed SSN algorithm's necessity and effectiveness in real-time simulation for large power systems, especially multi-switch networks.

**Key words:** SSN; real-time simulation; wind generation; RT-LAB

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0098-06

## 0 引言

随着电力电子技术的发展, 不但电网的规模不断扩大且自动化程度也不断提高, 电力系统中许多计算和控制问题日益复杂, 从技术和安全上考虑直接进行电力试验可能性很小, 因此迫切要求运用电力仿真来解决这些问题。电力系统仿真软件是分析电力系统的最有效工具之一, 在系统设计、规划、运行、控制和调度等方面有广泛的应用<sup>[1]</sup>。

目前 Matlab/Simulink、PSCAD/EMTDC、PSASP 为国内应用比较普遍和易用的三款仿真软件<sup>[2]</sup>, 此三种仿真软件有本身的特定仿真对象及功能强项。Matlab/Simulink 下属的电力系统仿真工具箱 (SimPowerSystems, SPS)<sup>[3]</sup>包含电气网络中常见的元器件和设备, 以直观易用的图形方式对电气系统进行模型描述, 并依靠 Matlab 强大的分析、计算和

可视化功能, 通用性强、可移植性高, 为电力系统仿真和研究者带来了极大的便利, 使得其在如光伏、风力发电、微电网、电网研究等电力系统建模与仿真中得到了广泛应用<sup>[4-11]</sup>。众所周知, 基于 Simulink 的仿真属于伪实时仿真, 其仿真时间并不与实际时间同步, 而与机器的执行速度和模型复杂度有关, 当模型比较复杂时, 其运行所需时间将更长, 不利于产品开发。RT-LAB 实时仿真系统平台通过改进 SPS 的解算算法, 预计算电路拓扑, 将 Simulink 模型通过 Real-Time Workshop 生成 C 代码<sup>[12]</sup>, 编译成为下位机可执行的程序, 加速仿真, 实现了模型的实时化运行<sup>[13]</sup>。基于 RT-LAB 实时仿真平台, 可轻松地实现快速控制原型及硬件在环验证, 近些年得到了越来越广泛的应用。然而 RT-LAB 解算基础与 Simulink 一样仍然是基于状态空间, 当模型所包含的节点数比较多时, 尤其是开关器件比较多时, 将

整个系统只作为一个状态空间对电路拓扑进行预计算, 并针对数量众多且互相耦合的开关器件状态所做的大量预计算, 将需要很大内存空间及计算量, 给模型的实时化带来困难。SSN 算法通过将整个电路系统划分成两个或多个状态空间群组, 有效地减小了整个系统作为一个状态空间系统矩阵大小, 并实现不同群组在不同核里并行运算, 提高模型运行速度, 解决了大型多开关器件电力系统模型实时化遇到的问题。本文将所研究的 SSN 算法应用于大型双馈风力发电系统, 并通过仿真验证了 SSN 算法解决此类问题的有效性。

## 1 State-Space Nodal(SSN)算法

状态空间节点算法(SSN)也可认为是节点算法<sup>[14]</sup>。只是节点的划分不一样。SSN 算法, 允许用户划分所要实时化的系统到不同的群组<sup>[15]</sup>。每个群组就是一个独立的状态空间, 群组内的计算是通过状态空间的方法而相关联群之间的数据交互则是通过节点算法。适当的划分状态空间群组, 不但可减少系统的等效电气节点数还能减小每个群组的开关数及预计算量, 节省存储空间, 加速仿真。

### 1.1 状态空间组

任意给定电路群组可由式(1)的状态方程表示。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_k \mathbf{x} + \mathbf{B}_k \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_k \mathbf{x} + \mathbf{D}_k \mathbf{u} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 列向量  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{u}$  分别为状态变量和输入矢量, 状态变量可以是电容电压或者电感电流, 它们是电路中互不相关的变量的最大组合, 即最大无关组; 列向量  $\mathbf{y}$  为输出向量;  $\mathbf{A}_k$ 、 $\mathbf{B}_k$ 、 $\mathbf{C}_k$ 、 $\mathbf{D}_k$  为第  $k$  个开关序列所对应的状态矩阵。

对式(1)进行离散化有

$$\mathbf{x}_{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{A}}_k \mathbf{x}_t + \tilde{\mathbf{B}}_k \mathbf{u}_t + \tilde{\mathbf{B}}_k \mathbf{u}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

在式(2)中:  $\Delta t$  为积分时间步长;  $\tilde{\mathbf{A}}_k$ 、 $\tilde{\mathbf{B}}_k$ 、 $\tilde{\mathbf{C}}_k$ 、 $\tilde{\mathbf{D}}_k$  为状态矩阵  $\mathbf{A}_k$ 、 $\mathbf{B}_k$ 、 $\mathbf{C}_k$ 、 $\mathbf{D}_k$  离散后的矩阵。结合式(1)与式(2), 可将状态变量  $\mathbf{x}_{t+\Delta t}$  及输出  $\mathbf{y}_{t+\Delta t}$  表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{t+\Delta t} &= \tilde{\mathbf{A}}_k \mathbf{x}_t + \tilde{\mathbf{B}}_k \mathbf{u}_t + \tilde{\mathbf{B}}_k \mathbf{u}_{t+\Delta t} + \\ &\quad \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}}_{ki} & \tilde{\mathbf{B}}_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{i+\Delta t} \\ \mathbf{u}_{n+\Delta t} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{i+\Delta t} \\ \mathbf{y}_{n+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ki} \\ \mathbf{C}_{kn} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{kii} & \mathbf{D}_{kin} \\ \mathbf{D}_{kni} & \mathbf{D}_{knn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{i+\Delta t} \\ \mathbf{u}_{n+\Delta t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

上式中, 下标  $i$  表示群组内部源注入, 下标  $n$  表示由相连接外部节点注入。联立方程(4)的第二行与方程(3)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{n+\Delta t} &= \mathbf{C}_{kn} \left( \tilde{\mathbf{A}}_k \mathbf{x}_t + \tilde{\mathbf{B}}_k \mathbf{u}_t + \tilde{\mathbf{B}}_{ki} \mathbf{u}_{i+\Delta t} \right) + \mathbf{D}_{kni} \mathbf{u}_{i+\Delta t} + \\ &\quad \left( \mathbf{C}_{kn} \tilde{\mathbf{B}}_{kn} + \mathbf{D}_{knn} \right) \mathbf{u}_{n+\Delta t} \end{aligned} \quad (5)$$

很显然式(5)具有如下的形式

$$\mathbf{y}_{n+\Delta t} = \mathbf{y}_{k\text{hist}} + \mathbf{W}_{kn} \mathbf{u}_{n+\Delta t} \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{y}_{k\text{hist}}$  表示该状态空间组历史输出;  $\mathbf{W}_{kn}$  如式(7)示。

$$\mathbf{W}_{kn} = \mathbf{C}_{kn} \tilde{\mathbf{B}}_{kn} + \mathbf{D}_{knn} \quad (7)$$

对于式(6)可做如下两种解释: a) 如果  $\mathbf{y}_n$  表示注入群组的电流,  $\mathbf{u}_n$  代表节点电压, 那么  $\mathbf{y}_{k\text{hist}}$  就代表历史注入电流  $\mathbf{I}_{k\text{hist}}$ , 而  $\mathbf{W}_{kn}$  则是对应的导纳矩阵。这样就是一个诺顿等效电路类型, 称之为电压型 SSN 群组。b) 如果  $\mathbf{y}_n$  表示电压,  $\mathbf{u}_n$  表示注入群组的电流, 那么  $\mathbf{y}_{k\text{hist}}$  就代表历史电压  $\mathbf{V}_{k\text{hist}}$ , 而  $\mathbf{W}_{kn}$  则是对应的阻抗矩阵。这样就是一个戴维南等效电路类型, 称之为电流型 SSN 群组。

综上两种情况, 对于一个群组, 可将式(6)重写成如式(8)的形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{n+\Delta t}^I \\ \mathbf{I}_{n+\Delta t}^V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{k\text{hist}} \\ \mathbf{I}_{k\text{hist}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{II} & \mathbf{W}_{IV} \\ \mathbf{W}_{VI} & \mathbf{W}_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+\Delta t}^I \\ \mathbf{V}_{n+\Delta t}^V \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, 上标  $I$ 、 $V$  分别表示电流型和电压型关系。移相将  $\mathbf{I}_{n+\Delta t}^I$ 、 $\mathbf{V}_{n+\Delta t}^V$  分别划分到等式的两端, 将其转化为节点表达式, 有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+\Delta t}^I \\ \mathbf{I}_{n+\Delta t}^V \end{bmatrix} = \mathbf{\Gamma}_{kn} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{k\text{hist}} \\ \mathbf{I}_{k\text{hist}} \end{bmatrix} + \mathbf{Y}_{kn} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{n+\Delta t}^I \\ \mathbf{V}_{n+\Delta t}^V \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{Y}_{kn}$  为该节点群组的导纳矩阵;  $\mathbf{Y}_N$  为由  $\mathbf{Y}_{kn}$  组成的全局节点导纳矩阵。

$$\mathbf{I}_{N+\Delta t} = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}_{N+\Delta t} \quad (10)$$

其中:  $\mathbf{I}_N$  为已知的节点电流输入; 而  $\mathbf{V}_N$  为所有未知的节点电压。如果所有的开关状态没有发生变化

而且式(3)所描述的分段线性的器件保持在上一个步长的值,那么导纳矩阵 $Y_{kn}$ 不会发生变化。

### 1.2 SSN 算法执行步骤

SSN 算法结合了状态空间和节点分析,其主要算法包括状态空间求解和节点分析。其完整步骤可概括如下。

- 1) 预计算。对于每一种开关状态预计算电路拓扑包括离散状态空间矩阵、导纳矩阵及状态初始值,并储存在内存中。
- 2) 更新每个群组的开关状态。
- 3) 根据 2) 中的开关状态选择每个群组的离散状态空间。
- 4) 根据已知输入源及历史状态更新节点注入。
- 5) 更新导纳矩阵。
- 6) 求解节点方程  $I_{N_{t+\Delta t}} = Y_N V_{N_{t+\Delta t}}$ 。
- 7) 根据 6) 中结果更新各群组状态方程。
- 8) 输出计算结果,并判断是否达到仿真停止时间,若没有则返回 2),若是,则结束。

SSN 算法流程图如图 1 所示。

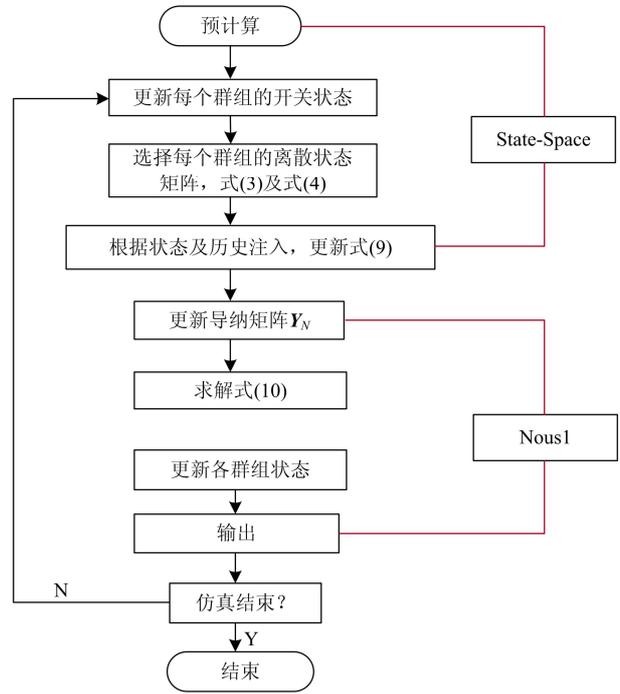


图 1 SSN 算法流程图

Fig.1 Flow chart of SSN method

## 2 SSN 算法在大型风电系统应用

为了验证 SSN 算法的快速性、有效性及稳定性,将所研究的算法应用于包含开关器件众多的大型双馈风力发电系统,下载到 RT-LAB 实时仿真机进行了实时仿真,并详细分析了仿真结果。

### 2.1 双馈风力发电系统

图 2 为仿真所研究的风力发电系统,系统具有

独立的有功及无功控制,并具备低电压穿越功能(LVRT)。其中 DFIG 的容量为 1.5 MW,通过输电线及变压器连接到一个 110 kV 无穷大电网。为模拟 DFIG 的故障穿越能力,模型中加入了故障注入模块(Fault)、转子过电流速接短路保护(Rotor crowbar)及直流过电压保护(DC crowbar)。

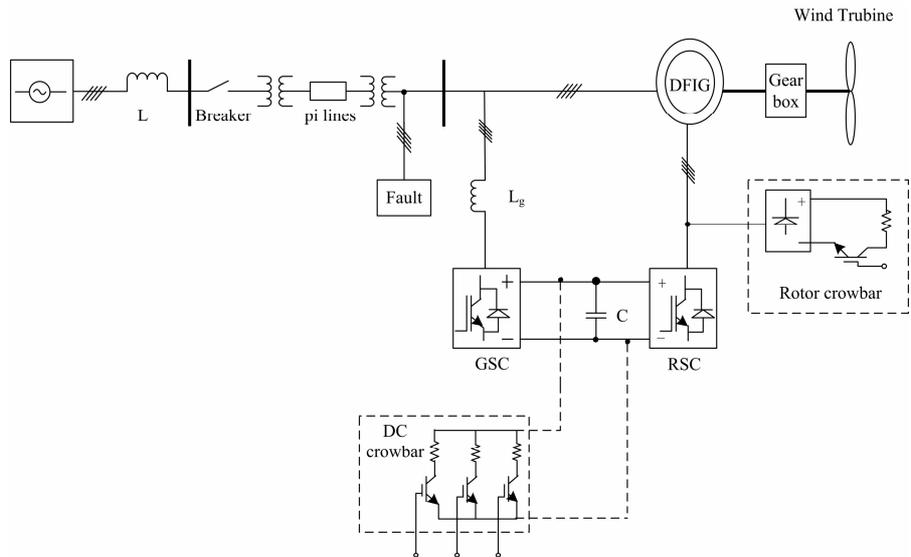


图 2 DFIG 系统

Fig.2 DFIG system

仿真中, Rotor crowbar 采用和 DC crowbar 一样的结构, 并假设 GSC 和 RSC 共有 6 个开关器件(其中 GSC 采用的是 RT-LAB 封装的 TSB 桥), 则模型中包含的开关器件数将多达 19 个。

情形 A1: 不对模型做任何处理, 其解算为一个大的状态空间, 如式 (11)。

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_n + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_{n+1}, k = 1, 2, \dots \quad (11)$$

因为实时仿真时仿真器会对每种开关状态都进行预计算并存储预计算所得到的系统矩阵, 则  $k$  的取值将多达  $2^{19}=524\ 288$  个, 显见系统矩阵所需的存储空间将是巨大的, 且每次开关动作计算量也是巨大的。

情形 B1: 通过在图 3 所示位置插入一个 3 相

SSN 节点, 将整个系统划分为两个群组, 群组 1 和群组 2, 则其计算如式(12)~式(14)。

$$\mathbf{x}_{n1+1} = \mathbf{A}_{k1} \mathbf{x}_{n1} + \mathbf{B}_{k1} \mathbf{u}_{n1+1}, k1 = 1, 2, \dots, 2^{12} \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_{n2+1} = \mathbf{A}_{k2} \mathbf{x}_{n2} + \mathbf{B}_{k2} \mathbf{u}_{n2+1}, k2 = 1, 2, \dots, 2^7 \quad (13)$$

$$\mathbf{I}_{no_{n+1}} = \mathbf{Y}_{3,3} \mathbf{U}_{no_{n+1}} \quad (14)$$

式 (12) 表示群组 1 的状态空间, 因为其只有 12 个开关, 所以其系统矩阵预定义个数即为  $2^{12}=4\ 096$ , 而群组 2 仅仅只有 7 个开关, 故  $k2$  的最大值为  $2^7=128$ , 并且两个群组将分别在不同的核上计算, 相对情形 1, 显见节省了所需存储空间, 减小每个核的运算量, 提高了运算速度。很容易满足实时要求。

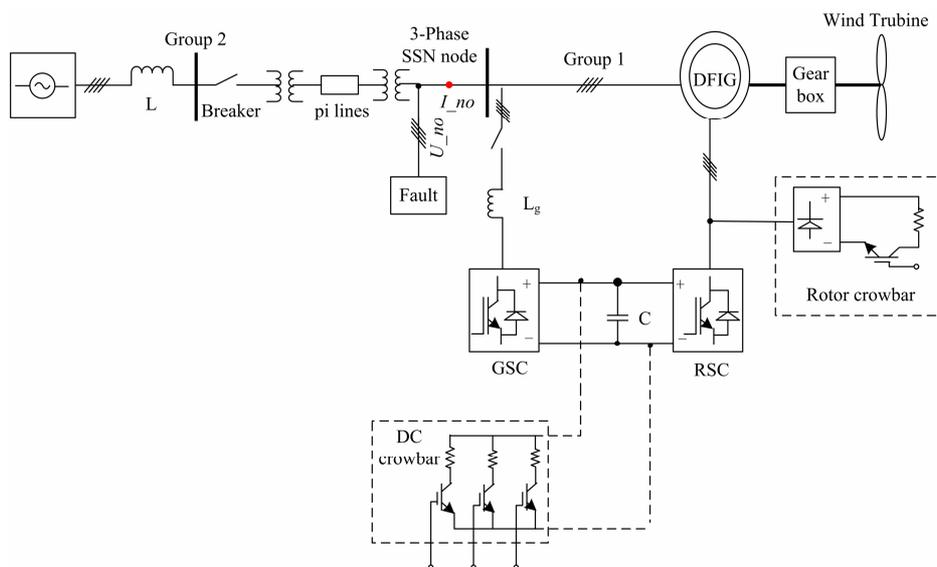


图 3 3-Phase SSN node 系统

Fig. 3 3-Phase SSN node system

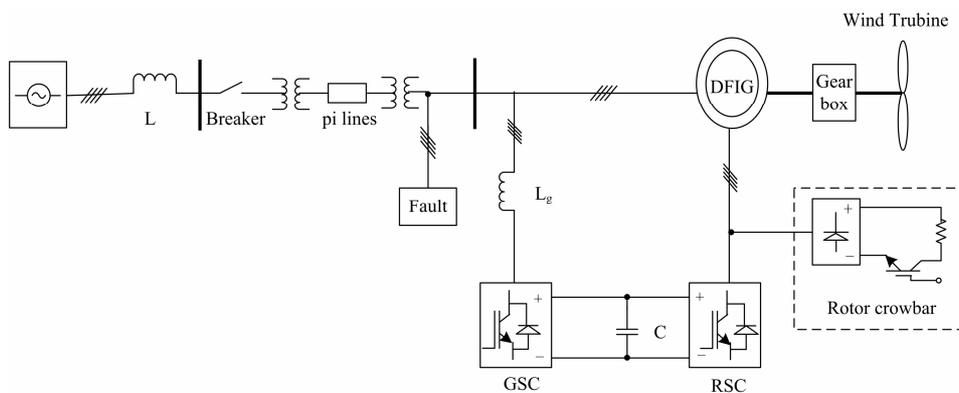


图 4 精简的 DFIG 系统

Fig. 4 Reduced DFIG system

## 2.2 仿真信息

情形 A1 在实时化时, 由于开关器件众多超出了单个核所能处理的能力, 系统报错, 无法进行仿真。在不影响仿真结果比较的情况下, 将情形 A1 系统进行精简, 结果如图 4 所示, 称之为情形 A2。为与情形 A1 形成明显对比, 将情形 B1 也进行相应精简, 称之为情形 B2, 表 1、表 2 分别为精简前与精简后系统信息及所需的存储空间容量。

表 1 精简前的信息表

Table 1 Information before reducing

群组编号	状态量	输入量	输出量	开关数	所需空间
1	2	26	36	12	60.8
2	21	19	16	7	
No_SSN	27	45	52	19	2 895.38

其中, 群组 1 和 2 为采用 SSN 算法两个群组的信息及所需的存储空间, No-SSN 表示其对应系统未采用 SSN 算法的信息及所需空间容量。由表 1 可知, 若不采用 SSN 算法, RT-LAB 实时化该模型需要近 3 GB 的内存空间, 导致模型无法实时化。而同样的系统通过采用 SSN 算法将整个系统划分为两个状态空间, 所需的空间只有 60 MB。

表 2 精简后的信息表

Table 2 Information after reducing

群组编号	状态量	输入量	输出量	开关数	所需空间
1	6	23	33	9	14.45
2	21	16	13	4	
No_SSN	27	39	46	13	384.76

其中, 群组 1 和 2 为采用 SSN 算法两个群组的信息及所需的存储空间, No-SSN 表示其对应系统未采用 SSN 算法的信息及所需空间容量。从表中不难看出, SSN 算法并没有改变系统总的状态变量及开关数等, 但前一种情况所需的存储空间不到 15 MB, 极大程度减少了所需的存储空间。

## 2.3 仿真结果

设定风速为 12 m/s, 无功功率给定为 -0.4 pu, 仿真步长设置为 50  $\mu$ s, 系统稳定后使电网电压由 1.0 pu 突降到 0.5 pu, 比较使用 SSN 算法和不使用该算法下发电机输出的电磁转矩、有功功率及无功功率, 如图 5~图 7 所示。

其中虚线表示采用了推荐的 SSN 算法所得的仿真结果, 从图中可以看出, 由于电网电压突然跌落, 使得发电机的电磁转矩、无功功率及输出的有功功率发生了剧烈突变, 采用了 SSN 算法所得的结果几乎与没有采用该算法的结果基本一致。

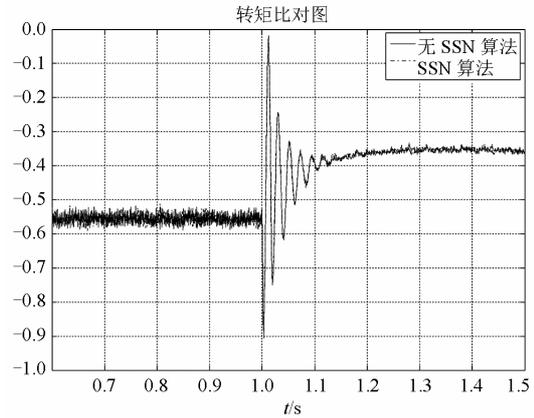


图 5 发电机电磁转矩变化

Fig. 5 Generator electromagnetic torque changes

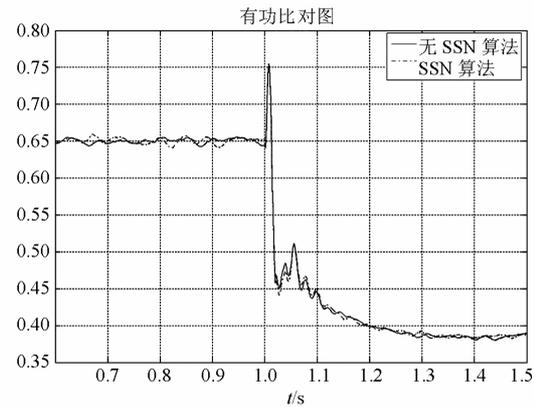


图 6 发电机有功功率变化

Fig. 6 Generator active power changes

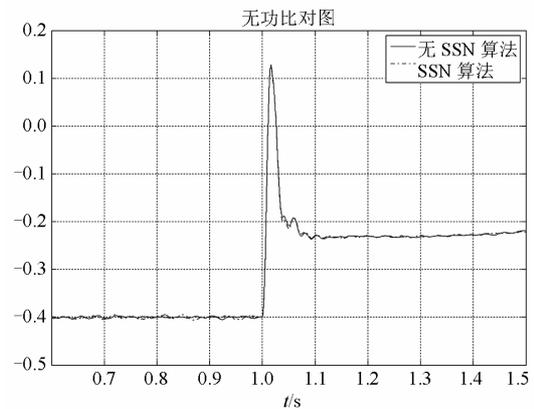


图 7 发电机无功功率变化

Fig. 7 Generator reactive power changes

## 3 结论

在大型电力系统实时仿真中, 尤其是开关器件众多的场合, 其所需大量的存储空间及计算量, 将可能导致仿真器无法对所要仿真的系统进行实时化。SSN 算法通过将大的系统适当地划分为两

个或多个群组, 组成各自的状态空间, 在不同的核上进行并行运算, 有效地减小了所需的存储空间, 并在一定程度上减少了整个系统的计算量, 提高仿真速度。仿真结果也表明, 所推荐的算法不会改变系统总的输入量、输出量、状态量及总的开关数, 也没有对系统带来任何不容忽视的影响, 可有效地解决多开关场合大型电力系统的实时化仿真问题。

### 参考文献

- [1] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 312-316.
- [2] 李广凯, 李庚银. 电力系统仿真软件综述[J]. 电气电子教学学报, 2005, 27(3): 61-65.  
LI Guang-kai, LI Geng-yin. The summary of power system simulation software[J]. Journal of Electrical & Electronic Engineering Education, 2005, 27(3): 61-65.
- [3] The Math Works. SimPowerSystems user's guide[M]. Version 5.5. Hydro-Quebec: The Math Works Inc, 2011: 11-27.
- [4] 姚李孝, 姚金雄, 安源. 基于 Matlab/Simulink 的高压输电线路故障定位的仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 53-56.  
YAO Li-xiao, YAO Jin-xiong, AN Yuan. Fault location simulation for high voltage power transmission line based on Matlab/Simulink[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 53-56.
- [5] 牟晓春. 微电网综合控制策略的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2011.  
MOU Xiao-chun. Study on the control strategies of microgrid[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2011.
- [6] 陈瑶. 直驱型风力发电系统全功率并网变流技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [7] 谢秉鑫, 王宗, 范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 116-119, 130.  
XIE Bing-xin, WANG Zong, FAN Shi-lin. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 116-119, 130.
- [8] 吴国祥. 变速恒频双馈风力发电的若干关键技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [9] 胡胜. 双馈风力发电机在电网故障和不平衡条件下控制技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
HU Sheng. Research on control technology of DFIG under grid faults and grid voltage unbalance conditions[J]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [10] 李明, 易灵芝, 彭寒梅, 等. 光伏并网逆变器的三环控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 46-50.  
LI Ming, YI Ling-zhi, PENG Han-mei, et al. Research of three-loop control method of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 46-50.
- [11] 李海平, 唐巍. 风/光/储混合微电网的详细建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 132-138.  
LI Hai-ping, TANG Wei. Detailed modeling and simulation of wind/PV/storage hybrid micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 132-138.
- [12] MATLAB, Simulink and Real Time Workshop user's guides[M]. The Mathworks Inc., 1990-2010.
- [13] RT-LAB user's guide[M]. Version 10.4. The Opal-RT Technologies Inc., 2007.
- [14] DUFOUR C, MAHSEREDJIAN J, BELANGER J. A combined state-space nodal method for the simulation of power system transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(2): 928-935.
- [15] ARTEMIS user's guide[M]. Version 6.2. The Opal-RT Technologies Inc., 2008: 25-42.

收稿日期: 2013-09-09; 修回日期: 2013-11-27

作者简介:

谭伟(1987-), 男, 硕士研究生, 从事双馈风力发电控制及电力系统仿真研究; E-mail: icodeconnection@126.com

邱华静(1987-), 男, 工程师, 从事现代电机控制技术的研究。