

# 分布式同步发电机励磁系统动态性能研究

姚健<sup>1</sup>, 刘爱军<sup>2</sup>

(1. 江苏联能电力科学研究院, 江苏 南京 210016; 2. 国电科学技术研究院有限公司, 江苏 南京 210031)

**摘要:**研究分布式发电系统中同步发电机的典型励磁系统的动态性能,通过研究短路电抗,  $X/R$  的关系变化、故障清除上升时间、系统的最大有功功率和电压曲线,并通过使用软件对仿真环境进行模拟,充分研究了励磁系统性能,同时综合考虑了励磁系统的维护成本。分析结果表明,静态励磁系统具有更好的动态抗干扰性和较低的维护成本。因此,在分布式同步发电机励磁适用性方面,静态励磁系统具有优于其他励磁系统的优点。

**关键词:**同步发电机; 分布式发电; 励磁系统; 性能

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1671-5276(2019)06-0183-03

## Research on Dynamic Performance of Distributed Synchronous Generator Excitation System

YAO Jian<sup>1</sup>, LIU Aijun<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Lianneng EPRI, Nanjing 210016, China; 2. Guodian EPRI Co., Ltd., Nanjing 210031, china)

**Abstract:** This paper mainly studies the dynamic performance of typical excitation system of synchronous generator in distributed generation system. By studying the short circuit reactance, the relationship between  $X/R$ , the rise time of fault clearance, the maximum active power and voltage curve of the system, the software is used to simulate the simulation environment and the performance of the excitation system is fully studied. At the same time, the maintenance cost of the excitation system is considered comprehensively. The analysis results show that the static excitation system has advantages of better dynamic anti-jamming ability and lower maintenance cost. Therefore, in the field applicability of the distributed synchronous generator, the static excitation system has advantages over other excitation systems.

**Keywords:** synchronous generator; distributed generation; excitation system; performance

## 0 引言

目前,分布式发电光伏、燃机等系统应用越来越多,按照励磁系统来分类可分为同步型、异步型及逆变型。本文研究分布式发电系统同步电机<sup>[1-4]</sup>励磁系统,主要类型有<sup>[5-7]</sup>:直流励磁、无刷交流励磁、静态励磁、复合励磁。应用 MATLAB 可视化仿真工具 SIMULINK,开展了分布式同步发电励磁系统模型仿真研究,包括以下内容:1) 系统  $X/R$  比值变化;2) 发电机短路电抗;3) 励磁系统故障清除时间(不计发电损失);4) 不失稳发电机注入系统的功率;5) 出口电压。

## 1 仿真模型

美国某公司 MATLAB 平台和附加的 SIMPOWERSYSTEM 软件包在励磁系统仿真研究领域得到了广泛应用。本文仿真模型中,电力系统的仿真采用三相模型,电磁仿真,变量瞬时值,模型见表 1。模型初始化使用 POWERSYSTEMS。在动稳仿真时考虑恒定阻抗的负载,在电压稳定前提下使用异步发电机模型来仿真<sup>[8-10]</sup>。

表 1 SIMULINK 组件

组件	SIMULINK
电力系统	三相电源模块
变压器	三相变压器(双绕组)
蒸汽轮机	蒸汽轮机和调速器
柴油机	柴油发动机总监控
异步电动机	异步电机块
静载荷	三相并联 RLC 负载块

### 1) 发电机模型

使用次暂态模型来表示同步发电机,在仿真时忽略定子瞬变,简化至六阶模型<sup>[11]</sup>。

### 2) 励磁系统模型

对于并网同步发电机的励磁系统,通常采用两种控制方式:恒压或恒功率因数<sup>[1,12-13]</sup>,研究仅考虑恒压。

直流励磁的典型代表 IEEE DC1A 型的励磁机控制直流换向器励磁器,具有连续调整电压控制器<sup>[14-15]</sup>。DC1A 模型如图 1。

在  $\sum$  求和点,  $V_{REF}$  减去电压  $V_c$  和电压  $V_f$  的值,通过

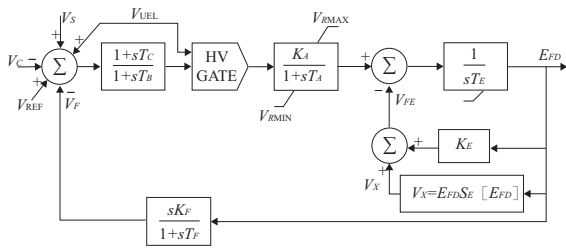


图1 DC1A模型

时间常数  $T_A$  和增益  $K_A$  进行放大,励磁饱和值通过  $V_X$  信号并入。

无刷交流励磁典型模型 IEEE AC1A 如图2所示。模型包括整流器输出  $F_{EX}$ 、整流调节  $K_C$ 、励磁同步瞬态电抗  $K_D$  引起的励磁机输出电压值关系。

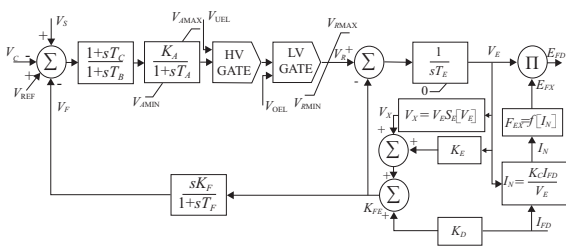


图2 AC1A模型

静态励磁系统典型模型 IEEE ST1A 如图3所示,模型描述 ST1A 系统通过变压器接入发电机端或发电机出口母线,经整流器控制。

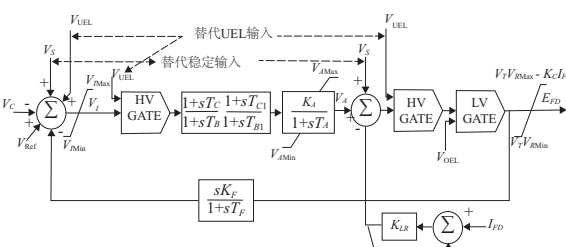


图3 ST1A模型

复合励磁其实是静态系统的一种,利用发电机电流源和电压源来构成模型。典型代表如 IEEE ST2A 模型(图4)。复合指通过发电机端子电压和电流短路电气特性及专门变压器来馈送主机、励磁机。

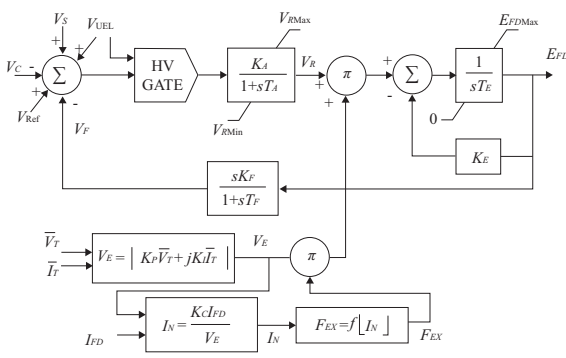


图4 ST2A模型

## 2 仿真结果

### 1) 故障清除时间

仿真计算结果考虑了在近发电机出口发生三相短路故障时,发电机可以不失步继续运行的时间。仿真每种励磁系统,故障清除时间计算结果见表2。

表2 临界故障时间 单位:ms

励磁系统	直流	无刷交流	静态	复合
与电网相连	243	242	241	258

故障发生在发电机出口时,故障清除时间的仿真结果值较低。对于直流、无刷交流、静态励磁,复合系统励磁似乎具有更好的性能。但这种性能在保护装置中毫无优势,并网的发电机易引起系统故障。

### 2) 最大有功功率

故障时能够提供的最大有功功率注入网络节点,不会干扰网络或造成发电机失稳。仿真分析选取系统 200 ms 短路持续,观察功角情况直至系统失稳。仿真结果见表3。

表3 最大有功功率 单位:MW

励磁系统	直流	无刷交流	静态	复合
与电网相连	22.2	22.1	22.1	23.8

在仿真中,复合励磁的性能比直流、无刷交流和静态励磁更好,所有负载水平都能提供较低故障角,同时在相同点处可以提供较高的励磁电压值,减少稳定性损失和失真角度<sup>[16]</sup>。

### 3) 转子角度与故障清除时间

仿真表明,静态励磁配置具有最高的转子角,时间常数小,暂态响应特别快。图5为励磁的转子角度与故障清除时间曲线。

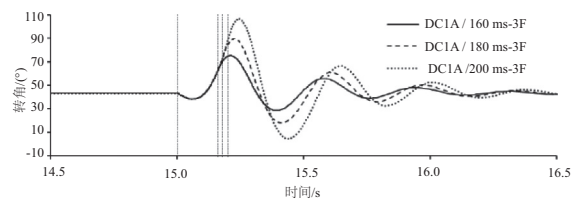


图5 转子角与故障清除时间

### 4) 转子速度偏差与故障清除时间

仿真发电机动态特性可以得到发电机阻尼率曲线。仿真转子速度振荡简化二阶动力系统,对每条曲线采用对数递减法<sup>[17]</sup>获得2个对应于顶部和底部包线的阻尼率。同指数采用算术平均值。

增加故障清除时间,降低阻尼率,同步电机的波动变大,静态励磁、复合励磁性能与直流、交流励磁系统性能接近,见图6。

### 5) 转子角度与系统短路能力

短路电抗是系统稳定计算重要参数,仿真对配电、输电网络电路,选取不同短路电抗,传输功率依次为 500

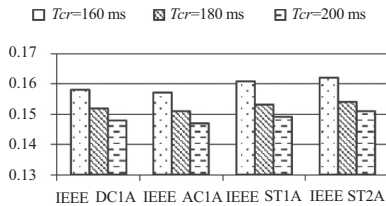


图6 转子转速偏差率与故障清除时间

MVA、3 500 MVA和9 500 MVA,故障清除时间为200 ms。静态励磁仿真结果见图7。

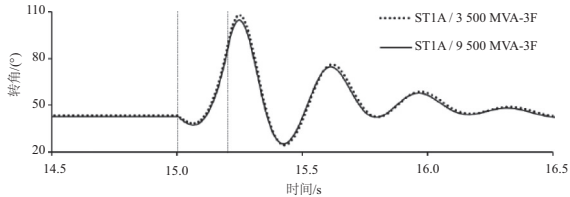


图7 系统短路电抗的转子角

结果表明,系统短路电抗越低,故障后角度值越高,发电机失步概率增加,励磁动态性能恶化。与具有交流或直流励磁器的励磁系统相比较,静态具有较低的时间常数和快速响应时间。

#### 6) 转子速度偏差与系统短路能力

短路电抗降低,阻尼率也降低。在500 MVA 短路电抗下,静态励磁具有最高的转子速度偏差,确保系统短路能力较低时能从励磁系统获得更好的响应,如图8所示。直流励磁和交流励磁具有较低的转子速度偏差,说明即使具有主发电机和励磁机高时间常数,励磁性能也较差。

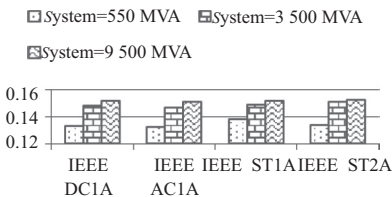


图8 转子转速偏差与系统短路电抗

#### 7) 转子角度与系统 X/R

较低的 X/R 比值不考虑  $P_v$  和  $Q_v$  形式去耦系统,励磁系统影响系统节点电压、损耗。对配电输电系统在3个 X/R 比值下仿真,故障清除时间设定为200 ms内。

X/R 比值从 X/R=0.5 增加到 X/R=3.0,所有系统的转子后故障角最大值都下降,随着 X/R 比从 X/R=3.0 增加到 X/R=8.0,故障转子角也增加。

电机失步影响励磁系统扰动时间,在相同的短路能力、短路电抗下,X/R 比值变化,R 也发生变化,X/R 比值增加导致仿真过程中 X/R 对 R 值的影响减小,从而提出扰动发生在发电机附近。

#### 8) 转子转速偏差与系统的 X/R

仿真结果显示,X/R 在0.5、3.0和8.0处,静态励磁呈现闭环情况,这表明静态励磁优于其他系统。

#### 9) 成本分析

为了获得励磁系统平均制造成本,选取实际的某电机厂18.75 MVA 同步发电机的预算成本以及各励磁系统实际平均成本,计算考虑单个控制励磁通道和三相桥整流、励磁开关断路器、灭弧装置的价格。由于直流励磁系统不再由传统发电机制造商组装,导致价格较高。在成本方面,复合励磁的发电机价格最高,预算约占制造成本的13%,与静态励磁相比维护成本高。如果复合励磁某些部件需要特制,特制部件的价格可能会比最低价格高出70%。静态励磁的预算增加50%,可以达到交流励磁配置的价格。静态励磁具有更好的动态性能和较低的维护成本,也可以保证短期内收回成本。

## 3 结语

通过仿真计算和分析可得出以下结论:静态励磁是分布式发电励磁系统的最佳选择,其抗动态干扰的性能优于直流和无刷励磁系统,在大多数情况下接近复合系统。静态励磁系统的维护成本低于所有研究类型的成本,系统不使用特殊变压器,设计难度低,可以运行于较高电压限值,受到故障干扰时可输出较高电压、电流。

#### 参考文献:

- [1] JENKINS Nick, ALLAN Ron, CROSSLEY Peter, et al. Embedded generations[M]. London, England: Institution of Electrical Engineers-IEE, 2000.
- [2] 姚辉. 同步发电机励磁实时仿真测试系统研究[D]. 西安:西安理工大学, 2005.
- [3] 陈亚民. 同步发电机电磁暂态过程的实用方程[J]. 电力系统及其自动化学报, 1995, 7(3): 18-25
- [4] HADJSAID N., CANARD J. F., DUMAS F. Dispersed generation impact on distribution networks[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1999, 12(2): 22-28.
- [5] ARTALE Giovanni, CATALIOTTI Antonio, COSETINO Valentina, et al. Smart interface devices for distributed generation in smart grids: The Case of Islanding[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7803-7811.
- [6] 何丙茂. 对同步发电机励磁系统若干问题的思考[J]. 电网技术, 1999, 23(3): 28-31.
- [7] MANASSERO G., SANTO S. D., SOUTO L. Heuristic method for fault location in distribution feeders with the presence of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2849-2858.
- [8] 竺士章. 发电机励磁系统试验[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [9] FREITAS W., VIEIRA J. C. M., MORELATO A., et al. Influence of excitation system control modes on the allowable penetration level of distributed synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 474-480.
- [10] SAA JF Delgado, M Etin. Discriminative methods for classification of asynchronous imaginary motor tasks from EEG data[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2013, 21(5): 716-724.
- [11] 周春立, 杨尔滨, 郭子刚, 等. 同步发电机励磁装置实验电源的研制[J]. 哈尔滨电工学院学报, 1994(4): 410-414.

(下转第213页)