

# 基于 GTO 的 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性的研究

王树东<sup>1</sup>, 杨钊<sup>1</sup>, 高翔<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 电气与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃预备役师 自动化站, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对永磁直驱风电机组和基于 GTO 的 48 脉波 + 100Mvar STATCOM 的数学模型, 采用 MATLAB 中的仿真工具 Simulink 建立永磁直驱风电机组的模型和静止同步补偿器的模型。得出了基于 GTO 的静止同步补偿装置对电场暂态电压稳定性的结论: 可以从感性到容性平滑的调节无功功率, 自动发出 GTO 通/断控制脉冲, 快速投切电容器, 实现对供电线路无功功率的跟踪调节。仿真结果表明: STATCOM 能够快速平滑地向电网节点注入或吸收无功功率从而在一个周波时间维持节点电压稳定, 改善电能质量。

**关键词:** 48 脉波; 风电场; 静止同步补偿装置; 电压稳定

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3886.2016.05.016

[中图分类号] TN609 [文献标识码] A [文章编号] 1000-3886(2016)05-0047-03

## A Study on Improvement of Transient Voltage Stability of Wind Power Generation Farm through GTO-based STATCOM

Wang Shudong<sup>1</sup>, Yang Zhao<sup>1</sup>, Gao Xiang<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;

2. Head of Automation Station, Gansu Reserve Division, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** In the case of permanent magnet direct drive wind turbine set and GTO-based 48-pulse wave + 100 Mvar STATCOM mathematical model, a permanent magnet direct drive wind turbine set model and a static synchronous compensator model are established by using MATLAB simulation tool Simulink. It is concluded that the GTO-based static synchronous compensator can stabilize the transient voltage of the electric field. Thus, it is made possible to adjust reactive power smoothly in the perceptual-capacitive aspect, send GTO on/off control pulses automatically, switch on/off the capacitor quickly and realize tracking regulation of the reactive power of the power supply line. The simulation results show that STATCOM can quickly and smoothly inject or absorb reactive power to/from the grid node, thus maintaining node voltage stability in one cycle wave period to improve the quality of power energy.

**Keywords:** 48-pulse wave; wind power farm; static synchronous compensator; voltage stability

## 0 引言

电力系统中电压偏离过大会影响电网设备的运行特性对系统带来不利影响, 而无功功率与系统电压水平是密切相关的, 为了保证系统电压必须具有充足的无功功率。这样就需要由电网来提供无功功率的支持<sup>[1]</sup>。

目前低压电力无功补偿装置大多以并联补偿装置为基础, 在输电网中, 其主要功能是改善潮流可控性, 提高系统的稳定性和传输能力<sup>[2]</sup>; 在配电网中, 其主要功能是提高符合电能质量和减小负荷对电网的不利影响。静止同步补偿器通常采用 GTO、方波电源型变换器 (VSC) 结构, 小功率的采用 IGBT、脉宽调制式 VSC 结构<sup>[3]</sup>。采用 GTO 静止同步补偿装置, 在输出正弦度、响应速度、低压特性等方面具有优越的性能。相同容量的 STATCOM 具有更好的实用性, 为保证足够的动态无功备用, 以 TCR 为核心的 SVC 在日常运行中需投入比 STATCOM 更多的容量, 带来的损耗也更大。所以以开关 GTO 来进行无功功率的方式在当今得到了很大的推广。针对机端暂态电压不稳定这种情况, 最好的解决方式应该是使用无功补偿装置来提供同步发电机运行过程中所耗

掉的无功功率来改善机侧的电压<sup>[4]</sup>。本文将 STATCOM 应用于直驱永磁同步机风电场, 作为动态无功补偿装置来提高风电场的暂态电压稳定性。

## 1 并网风力发电机组的数学模型

直驱型永磁同步

风力发电系统的系统结构如图 1 所示, 直驱型永磁风力机省去了齿轮箱及其部件<sup>[5]</sup>。简化了传动结

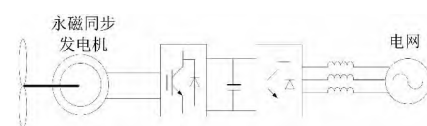


图 1 直驱式永磁同步风力发电系统结构

构, 提高了机组的可靠性, 并且减少了电能的损耗, 具有优越的低压穿越能力, 保持接入电网的稳定。风力发电机组动态数学模型包括风力机模型、传动机构模型以及同步发电机模型<sup>[6]</sup>。

### 1.1 风力机的数学模型

风力机是风电系统结构中不可或缺的, 它是把风能转换为风力机叶片的机械能量来维持发电机组稳定发电的<sup>[7]</sup>。通过流体力学可以得到, 风力发电系统产生的实际机械功率可由式 (1) 表达<sup>[8]</sup>:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

定稿日期: 2016-02-27

式中  $P_m$  为风机发出的机械功率;  $\rho$  为气体的密度;  $S$  为风力机叶片单为时间流过的面积;  $C_p$  为风能利用率;  $v$  气体流动速度;

在气体流动速度  $v$  相同的时候, 风力发电机获得的风机最大输入机械功率只决定于它的风能利用率  $C_p$  的数值,  $P_m$  是叶尖速比  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  之间的非线性函数<sup>[9]</sup>。风能利用率  $C_p$  可以近似用以下公式表示:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5173 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

式中

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (3)$$

### 1.2 机械传动链的数学模型

由于直驱型永磁风力发电机组没有升速齿轮箱和其他相关部件, 叶片和风力发电机直接连接在一起, 为了取得更好的研究, 本文把传动轴转动的阻尼和弹性作用下的质量块模型忽略不计<sup>[10]</sup>, 可表示为:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_g}{dt} \quad (4)$$

式中  $T_m$  为机械输入的转矩;  $T_e$  为电磁转矩;  $J$  为转动惯量;  $\omega_g$  为风力发电机的转速;

### 1.3 三相静止坐标系模型

为了研究准确我们分别规定每相绕组的电流和电压的正方向, 三相绕组各相相差 120 度, 建立三相静止坐标系<sup>[11]</sup>。将三相绕组表示为位于 ABC 轴上的线圈, 我们规定的正方向为电磁转矩和发电机转速的逆时针方向<sup>[12]</sup>。这样将得到永磁直驱风力发电机的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $R_s$  为定子等效电阻;  $\psi_A, \psi_B, \psi_C$  分别为 A、B、C 相绕组的磁链。PMSG 定子磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}$  为三相绕组每组的自感;  $L_{AB} = L_{BA}, L_{AC} = L_{CA}, L_{BC} = L_{CB}$  为三相绕组阻线之间的电磁互感;  $\psi_f$  为永磁体转子磁链。永磁同步发电机在 ABC 坐标系下的电磁转矩方程可以表示为:

$$T_e = n_p \left( \frac{1}{2} I_s^T \frac{\partial L}{\partial \theta} I_s + I_s^T \frac{\partial \psi_f}{\partial \theta} \right) \quad (7)$$

式中  $n_p$  为电机极对数;  $I_s = [i_A \ i_B \ i_C]^T$ ;  $\psi = [\psi_A \ \psi_B \ \psi_C]^T$ ;  $L$  为电感矩阵。

## 2 STATCOM 的数学模型

在目前来看 STATCOM 三相桥式电路我们大致可以分为两种类型, 一个是电压型, 一个是电流型。电压型是把直流端的电容单元作为储存能量模块, 将产生的不稳定直流电压经过 DC/AC 逆变器转换为稳定的交流电压, 最后在并入电网之前串联电

抗来实现<sup>[13]</sup>; 电流型桥式电路将直流侧的模块电容作为储存能量的单元, 将直流电流通过 DC/AC 转换为交流电<sup>[14]</sup>。图 2 是电压型静止同步补偿器的电压稳定性和运行控制策略, 其中  $m$  和  $\alpha$  分别表示的调制波的幅值和相位角, 假如我们把并网电力

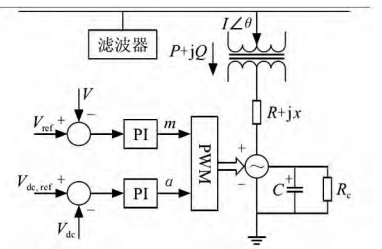


图 2 STATCOM 电压稳定性及控制策略图

系统看成理想的电压源, 则当静止同步补偿装置的交流端子其电压的最大值还小于系统电压稳定值  $V$  时, 流向补偿装置的电流的相位角将滞后 90 度, STATCOM 这时从电网中开始吸收无功, 表现为感性; 当 STATCOM 交流端子电压的最大值还高于系统电压稳定值  $V$ , 流向其电流的相位角将超前 90 度, 此时表现为容性<sup>[15]</sup>。

## 3 仿真分析

### 3.1 STATCOM 的稳态和动态特性

利用搭建 STATCOM 的模型, 该系统由 3 个 500 kV 的等效电压源通过长度为 200 km、75 km 和 180 km 的三条输电线路连接构成, 其中电压源的短路功率分别 100 MVA 的等效电压源为可编程电压源, 100 Mvar 的 STATCOM 并联在母线上。

设置电源电压为 1.049 pu 得到 STATCOM 终端电压为 1.0 pu, 电压线路电流为 0, 直流电压为 19.3 kV。t=0.1 s 时, 交流测电压跌落到 0.995 pu, STATCOM 向系统输出无功功率 (Q = 70 Mvar), 使得电压恢复到 0.979 pu。电压从 0.979 pu 恢复到 0.955 + 0.95 × (0.979 - 0.955) pu 所用时间大约为 0.045 s 左右。这时, 直流电压增大到 20.4 kV。t=0.2 s 时, STATCOM 交流测电压增大到 1.045 pu, STATCOM 从容性阻抗变成感性阻抗, 并从系统吸收 72

Mvar 无功功率以维持电压为 1.021 pu, 最后在 t=0.3 s 时, 电压恢复到 1.0 pu, STATCOM 输送的无功功率减少到零, 仿真结果表明: STATCOM 通过发出或吸收无功功率, 能够在在一个周波时间内快速抑制电压波动, 可控制节点电压波动为上下限阈值 0.03 pu 内从而维持节点电压稳定。如图 3 所示。

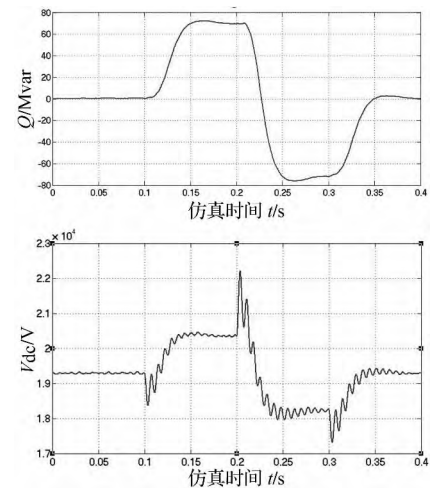


图 3 STATCOM 交流侧无功功率和直流侧电压

### 3.2 STATCOM 在风电场中的特性

将风力发电机组简化为单机无穷大系统, 风电场有 6 台 1.5 MW 的永磁同步发电机组, 风力发电机的出口电压为 580 V, 通

过 1 km 的输电线路在升压站点进行升压,使电压升高到 120 kV,然后接入单级无穷大系统,在 14.8 s 的时候风电厂箱发生三相短路,15.2 s 左右故障消除,如图 4、图 5 所示,显示了发生三相短路故障后 20 kV 母线上加入静止同步补偿装置和没有加入补偿装置两种情况下的功率,和电压的特性。图 5 可见,安装静止同步补偿装置后,电网给风电机组提供了无功功率补偿;在没有加入 STATCOM 静止同步补偿装置之前,母线上的电压急剧下降,0.1 s 后故障消失,但是风电场中电压却基本维持在 0.74 pu,使得电压跌落无法恢复,风电机组不能维持正常运行状态。而且很可能对接入的电力系统稳定性有很大影响,安装了 STATCOM 静止补偿装置后,系统故障时,STATCOM 静止补偿装置会给系统提供大量的无功功率支撑,此时减小了母线电压的跌落,从而使风电场快速恢复到正常运行状态,保证风电机组持续供电。从以上理论分析以及仿真结果表明,安装 STATCOM 静止补偿装置后,在很大程度上提高风电机组的暂态电压稳定,为风电机组正常并网提供了保证。

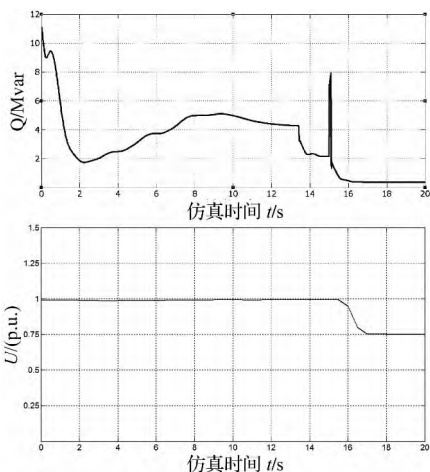


图 4 无 STATCOM 补偿时  
母线故障响应特性

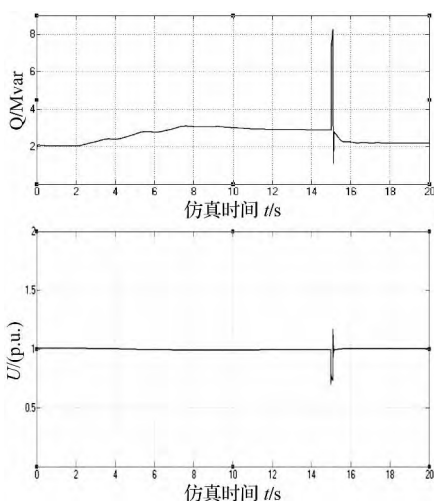


图 5 有 STATCOM 补偿时  
母线故障响应特性

#### 4 结束语

本文建立了永磁直驱风电机组的数学模型和在 Simulink 的仿真模型,同时也给出了 STATCOM 静止同步补偿器的数学模型和仿真模型,研究了风电场在发生三相短路故障时母线的响应特性。取得的进一步结果是:STATCOM 静止同步补偿器对电力系统能够提供无功功率的补偿,提高了同步风电机组的暂态电压稳定性,使低压穿越能力得到进一步的提升,提高风电场在接入电网后的电压暂态稳定性,并且也表明了 STATCOM 装置可快速精确地维持节点电压稳定,抑制电压波动,为用户提供较高的电能质量。

#### 参考文献:

- [1] 李俊峰,施鹏飞,高虎,等.中国风电发展报告 2010[M].海口:海南出版社,2010.
- [2] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2010,31(3):77-81.
- [3] 刘丽霞,衣书伟,姚衍民.静止无功补偿器在电压稳定中的分析研究[J].华东电力,2011,34(8):14-17.
- [4] 刘胜文,包广清,范少伟,等.兆瓦级直驱永磁风电系统低电压穿越研究[J].中国电力,2011,44(2):69-73.
- [5] 范伟,赵书强,胡炳杰.应用 STATCOM 提高风电场的电压稳定性[J].电网与清洁能源,2009,25(4):40-44.
- [6] 邓秋玲,姚建刚,黄守道,等.直驱永磁风力发电系统可靠性技术综述[J].电网技术,2011,35(9):144-151.
- [7] 郭学英,金晓林.基于超级电容器的风电系统低电压穿越特性研究[J].电工电气,2010,30(10):1-5.
- [8] 范高锋,迟永宁,赵海翔,等.用 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J].电工技术学报,2010,22(11):158-162.
- [9] 茅靖峰,孙玉坤,吴爱华,等.静止同步补偿器装置建模、控制与仿真研究[J].系统仿真学报,2012,19(10):2332-2336.
- [10] HOLDSWORTH L, JENKINS N, STRBAC G. Electrical stability of large offshore wind farms [C]. 7th International Conf. on AC-DC Power Transmission, London, UK, 2010: 156-161.
- [11] 李瑞,徐壮,徐殿国.并联型永磁直驱风电系统的环流分析及其控制[J].中国电机工程学报,2011,31(6):38-45.
- [12] 孙延昭.永磁直驱风电变流系统控制策略研究[D].湖南:湖南大学,2009.
- [13] 宋金梅,王波.两种 PWM 整流器控制策略之比较[J].变流技术,2009,31(5):30-32.
- [14] 宋雨倩,王印松,刘萌.直驱式永磁同步风力发电机组低电压穿越研究[J].仪器仪表用户,2012,112(19):72-74.
- [15] 郑荣美,朱凌.永磁风电系统低电压穿越控制策略研究[J].电力科学与工程,2012,28(4):14-18.

【作者简介】王树东(1965-),男,山东青岛人,教授。主要从事电力电子、智能控制检测技术的教学与应用研究工作。

for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles [C]. IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference, 2007: 284-289.

【作者简介】张晨晨(1988-),男,安徽安庆人,大学,技师,电气工程及其自动化。张鸿鹤(1980-),男,安徽巢湖人,本科,发电厂及电力系统专业,工程师,高级技师,有多年继电保护和电气试验工作经验,现从事超高压变电站运维工作。胡超(1985-),男,安徽巢湖人,博士生,电气工程专业。

(上接第 46 页)

- [9] 于玮,徐德鸿.基于虚拟阻抗的不间断电源并联系统均流控制[J].中国电机工程学报,2009,29(24):32-39.
- [10] XIAONAN LU. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2804-2815.
- [11] O TREMBLAY, LA DESSAINT, AI DEKKICHE. A generic battery model