

附加阻尼控制 SVC 在双馈型风电场中的应用研究*

张明光, 刘淼淼

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 将附加阻尼控制 SVC 应用于兆瓦级双馈型风电场并网系统, 在此基础上研究了系统的暂态过程。首先建立了双馈风电机组的动态模型, 水轮发电机组以及附加阻尼控制 SVC 的数学模型, 然后仿真研究了双馈型风电场并网以后对区域系统暂态过程的影响, 对比分析了风电场接入和故障情况下采用普通 SVC 和附加阻尼控制 SVC 的作用和效果, 仿真结果验证了建立模型和采取方法的正确性和有效性。

关键词: 双馈感应电机; 风电场; 动态模型; 附加阻尼控制; 暂态稳定性

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)04-0099-04

Research on the application of supplementary damping control SVC in wind plant based on DFIG

Zhang Mingguang, Liu Miaomiao

(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Supplementary damping control SVC is applied in an MW wind plant based DFIG integration on power system and transient process of the system is studied in this paper. In the process of analyzing, the dynamic models of wind turbines based on doubly-fed induction generator, and the mathematical models of hydraulic turbine and supplementary damping control SVC is established. Through the simulink research, transient process of regional system is studied. Under situations of system fault and an MW wind plant access, different effects of generic SVC and supplementary damping control SVC are analyzed comparatively and the simulation results verify the models and methods are correct and effective.

Key words: doubly-fed induction generator; wind farm; dynamic model; supplementary damping control; transient stability

风电场装机容量的增加使其对接入系统的影响越来越大, 更多的并网标准要求风电场具有电压控制、无功调节、有功频率控制等火电机组具有的控制功能^[1-2]。基于双馈电机的变速恒频风电机组在风力发电系统中得到了广泛应用, 其主要优点是可以在变速恒频运行的同时实现最大的风能捕获, 减小变流器容量, 实现有功、无功功率的灵活控制。随着风力发电系统在电网中所占比重的增大, 接入电网电压等级的提高, 大量风电的接入改变了系统原有的潮流分布、线路传输功率以及整个系统的惯量, 因此接入后系统运行的状态会发生变化^[3-5]。

风电机组接入后对电力系统的影响以及相关的稳定性问题已有了相关的分析和研究。参考文献[6]在

MATLAB/Simulink 仿真环境下建立基于风电机组的单机无穷大系统, 分析了故障后风电系统的稳定性问题, 得出了采用的输电线路越长, 基于异步电机的风电系统稳定性就会越差的结论; 参考文献[7]对挪威电网风电接入后的系统阻尼的分析结果表明, 风电场接入容量较小时不会对系统阻尼产生影响, 当风电场接入容量较大时, 基于普通异步发电机的风电机组能够增强系统阻尼, 对故障后的系统稳定性有利; 参考文献[8]通过建模分析, 得出通过控制风电机组的桨距角可以达到抑制区域间功率振荡的目的; 参考文献[9]通过将双馈电机转差信号引入转子侧变流器, 建立了适用于双馈异步电机励磁附加控制的 PSS 模型, 通过仿真分析验证了所采取

* 基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(2007GS04834)

应用奇葩 Example of Application

的方法能够改善风电场的系统阻尼。

本文在 MATLAB/Simulink 仿真环境下建立变速恒频双馈风电机组模型、水轮发电机组模型以及附加阻尼控制 SVC 模型,对所建系统进行时域仿真,分析了兆瓦级双馈型风电场接入后的系统功率、系统机电暂态过程以及附加阻尼控制 SVC 在提高系统远距离输电线路输电能力、阻尼线路功率振荡、增强系统暂态稳定性方面的效果。结果表明,兆瓦级双馈型风电场接入系统后会降低系统阻尼,导致系统出现振荡,采用附加阻尼控制 SVC 能够有效抑制风电接入系统后的功率振荡,增强系统的暂态稳定性。

1 双馈风电机组模型

为了能够准确进行风电接入系统后的电力系统暂态稳定性分析,需要建立适用于电力系统机电暂态分析的风电机组动态模型,使其能够充分反映在电网大扰动下的相应动态特性。

1.1 风电机组轴系模型

为正确反映双馈风电机组在电网大扰动下的响应特性,采用两质块的轴系模型,一个质块表示风力机惯量,另一个质块表示发电机惯量。风力机与发电机通过齿轮箱连接。两质块模型表示为^[10]:

$$\begin{cases} 2H_M \frac{d\omega_M}{dt} = T_M - T_C - D_M \omega_M \\ 2H_G \frac{d\omega_G}{dt} = T_C - T_E - D_G \omega_G \\ \frac{d\theta_S}{dt} = \omega_0(\omega_M - \omega_G) \end{cases} \quad (1)$$

其中, H_M 、 H_G 分别为风力机惯性常数和发电机惯性常数; D_M 、 D_G 和 D_S 分别为风力机、发电机和轴的阻尼系数, T_M 为风力机的机械转矩, T_C 是作用在发电机转子轴上的机械转矩。

$$\begin{cases} T_M = \frac{P_M}{\omega_M} \\ T_C = K_S \theta_S - D_S(\omega_G - \omega_M) \end{cases} \quad (2)$$

其中, K_S 为轴的刚度系数, P_M 为风轮的机械功率。

1.2 DFIG 数学模型

在暂态稳定性分析中,通常忽略网络的电磁暂态过程,因此变速恒频双馈感应电机定子的电磁暂态过程也可以忽略,消去转子电流,转子磁链用暂态电势 E'_d 、 E'_q 表示,则双馈感应电机方程可表示为^[10]:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - X'_s i_{sq} + E'_d \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + X'_s i_{sd} + E'_q \\ T_0 \frac{dE'_d}{dt} = -E'_d - (X_s - X'_s) i_{sq} + \omega_s T_0 u'_{rq} + s \omega_s T_0 E'_q \\ T_0 \frac{dE'_q}{dt} = -E'_q + (X_s - X'_s) i_{sd} - \omega_s T_0 u'_{rd} - s \omega_s T_0 E'_d \\ T_E = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

其中, X_r 为转子漏抗; X_m 为励磁电抗; X_s 为同步电抗;

X'_s 为暂态电抗; s 为滑差; T_0 为转子绕组暂态开路时间常数; u_{sd} 和 u_{sq} 分别为定子电压的 d 、 q 轴分量; u_{rd} 和 u_{rq} 分别为转子的 d 、 q 轴分量; $u'_{rd} = u_{rd} \frac{X_m}{X_r + X_m}$, $u'_{rq} = u_{rq} \frac{X_m}{X_r + X_m}$; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为定子电流的 d 、 q 轴分量; E'_d 、 E'_q 分别为暂态电势的 d 、 q 轴分量; ω_s 为坐标系旋转角速度,等于同步角速度 ω_0 。

双馈电机的转子运动方程包含在轴系方程中。

2 水轮发电机组模型

2.1 水轮机模型^[11]

水轮机模型如式(4)所示。其中, μ 为水轮机导水叶开度; P_m 为水轮机输出机械功率; T_w 为水流时间常数,一般取 0.5 s~4 s。

$$\frac{P_m}{\mu} = \frac{1 - T_w p}{1 + 0.5 T_w p} \quad (4)$$

2.2 水轮机调速器模型

在忽略死区和限幅作用后,对于水轮机调速系统建立以 ΔP_m 、 $\Delta \mu$ 和 Δx_2 为状态变量的状态方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta \mu \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{0.5 T_w} & \frac{K_{mt}}{0.5 T_w} \left(1 + \frac{T_w K_i}{T_s} \right) & \frac{K_{mt} T_w}{0.5 T_w T_s} \\ 0 & -\frac{K_i}{T_s} & -\frac{1}{T_s} \\ 0 & -\frac{K_\beta K_i}{T_s} & -\left(\frac{-K_\beta}{T_s} + \frac{1}{T_i} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta \mu \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_{mt} T_w K_\delta}{0.5 T_w T_s} \\ -\frac{K_\delta}{T_s} \\ -\frac{K_\beta K_\delta}{T_s} \end{bmatrix} \Delta \omega \quad (5)$$

其中, K_δ 为水轮机调速器测速环节的放大倍数; T_s 为水轮机调速器中继电器时间常数; K_{mt} 为标幺值转换系数; K_i 为调速器硬反馈放大倍数; K_β 为调速器软反馈放大倍数; T_i 为软反馈时间常数。

2.3 水轮机励磁系统模型

对于水轮机的励磁系统,可以得到以 ΔU_A 、 ΔE_f 和 ΔU_F 为状态变量的励磁系统状态方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_F \\ \Delta E_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_A} & 0 & -\frac{K_A}{T_A} \\ \frac{K_F}{T_F T_E} & -\frac{K_F}{T_F T_E} & -\frac{1}{T_F} \\ \frac{1}{T_E} & -\frac{1}{T_E} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_F \\ \Delta E_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_A}{T_A} & \frac{K_A}{T_A} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta U_{RSS} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, ΔU_i 为励磁系统电压测量环节输出电压; ΔU_A 为励磁系统电压调节器的输出; ΔU_F 为励磁系统负反馈环

应用奇葩

Example of Application

节(励磁系统稳定器)的输出; ΔE_f 为励磁系统输出电压。

2.4 附加阻尼控制 SVC 模型

如图 1 所示,附加阻尼控制一般由放大环节、复位环节、相位补偿(校正)环节、限幅环节组成,其输出作为 SVC 电压调节器的附加控制信号。复位环节是一个高通滤波器,作用是使阻尼控制环节在 $t \rightarrow \infty (p \rightarrow 0)$ 时的输出为零,屏蔽阻尼控制环节的稳态输入;相位补偿环节用来提供必要的超前-滞后特性以补偿阻尼控制环节输入(ΔP)与 SVC 接入点母线电压的相位滞后。本文中采用 2 个一阶环节,在实际中也可以用更多的一阶环节或二阶环节,以达到理想的相位补偿效果;限幅环节主要限制阻尼控制环节产生附加控制电压的调节幅度,避免超调。本文选取 $u_{\max}=0.15 (u_{\min}=-0.15)$,即限幅环节将阻尼控制环节输出调节量的幅值范围限制为 ± 0.15 p.u.。

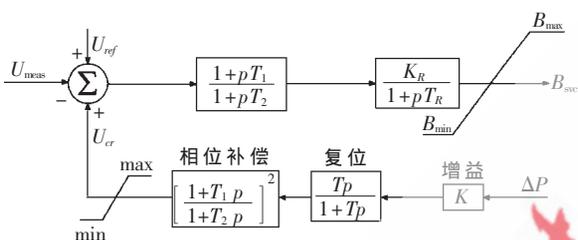


图 1 附加阻尼控制 SVC 框图

其中, U_{ref} 为参考电压、 U_{mes} 为节点测量电压、 U_{cr} 为辅助阻尼控制输入信号、 B_{SVC} 为 SVC 电纳参考值,这里通过加入附加控制信号改变固定的电压参考值以控制端电压的变化, U_{ref} 和 U_{cr} 相加作为控制器的有效参考值,进而使得 SVC 的输出电流围绕工作点波动,使接入点端电压按照期望的方式变化,达到增加系统阻尼的目的^[12]。

3 风电场及系统模型

风电场接入系统的方式如图 2 所示,仿真系统以某区域电网为依据进行等值处理, G_1 、 G_2 为系统等值机,系统 G_1 额定容量 1 000 MVA,系统 G_2 额定容量 5 000 MVA。

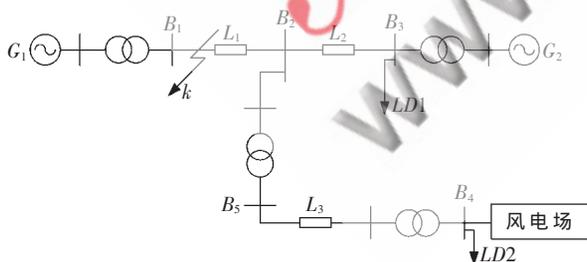


图 2 仿真系统结构

系统 G_1 、 G_2 为具有原动机、励磁系统控制功能的水轮发电机组,同步发电机采用六阶模型。等值负荷 LD1 和 LD2 为恒阻抗负荷,母线 B_2 处采用静止无功补偿器(SVC)以满足风电场接入后和故障期间系统电压的要求。风电场装机容量为 150 MW,采用 100 台单机容量为 1.5 MW 的双馈风电机组进行系统等值,机组采用恒端电压控制方式。

时域仿真分析中,将风电场接入系统后,分析对比使用普通 SVC 和阻尼附加控制 SVC 两种情况下的功率的变化和系统 G_1 、 G_2 发电机的转子动态过程。然后通过设置短路故障,故障位置考虑设在母线 B_1 和 B_2 之间输电线靠近母线 B_1 的一端,故障在 0.02 s 时刻发生,经过 4 个工频周期后在 0.1 s 时刻消失,考虑系统机组在使用附加阻尼控制 SVC 情况下的动态过程,分析其对风电场接入后系统暂态稳定性的影响。

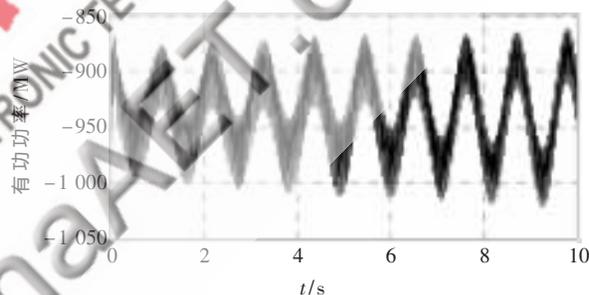
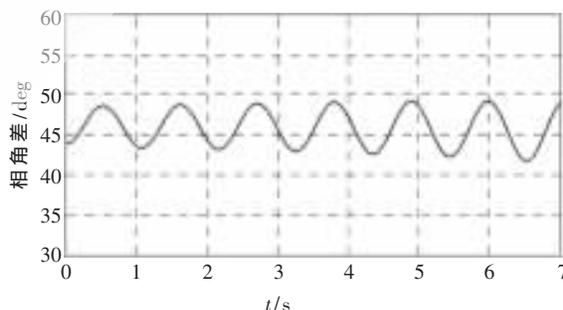
4 仿真分析

4.1 风电机组接入前后的时域仿真

对比分析风电场接入系统后,使用普通 SVC 和附加阻尼控制 SVC 两种情况下,系统发电机 G_1 有功功率、系统发电机 G_1 、 G_2 转子相角差、 G_1 转子角速度的变化。

4.1.1 风电场接入后,使用普通 SVC

由图 3、图 4 可以看出在系统配置普通 SVC 情况下,发电机 G_1 有功功率出现振荡,并且振荡的幅值逐步增大, G_1 、 G_2 转子相角差也出现在 $43^\circ \sim 48^\circ$ 之间接近于等幅的振荡,发电机 G_1 转子角速度振荡增加,说明风电场的接入激起了系统振荡。

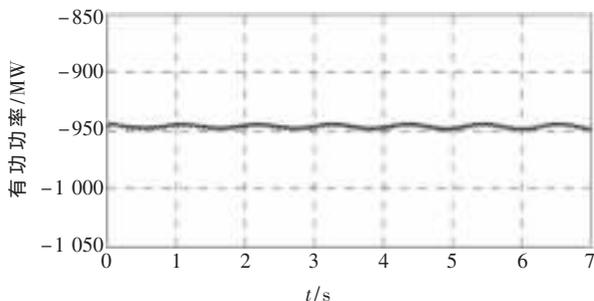
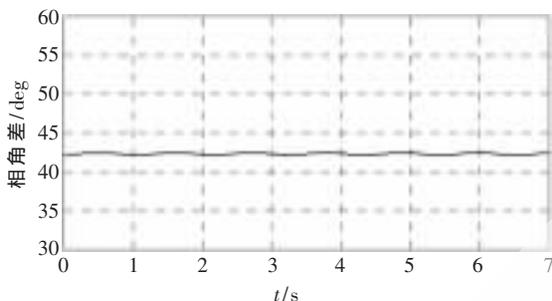
图 3 风电场接入后 G_1 有功功率图 4 风电场接入后 G_1 、 G_2 转子相角差

4.1.2 风电场接入后,使用附加阻尼控制 SVC

由图 5、图 6 可知在采用附加阻尼控制 SVC 代替普通 SVC 后, G_1 有功功率和 G_1 、 G_2 转子相角差能够基本保持不变,系统振荡得到有效的阻尼和抑制作用,稳定性得到加强。

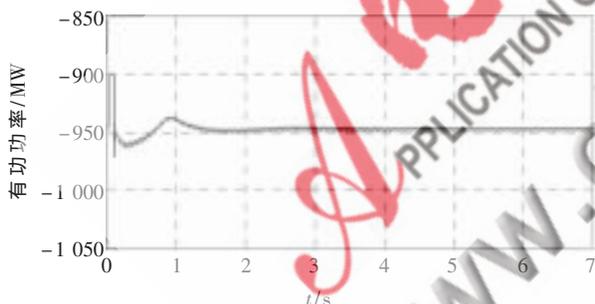
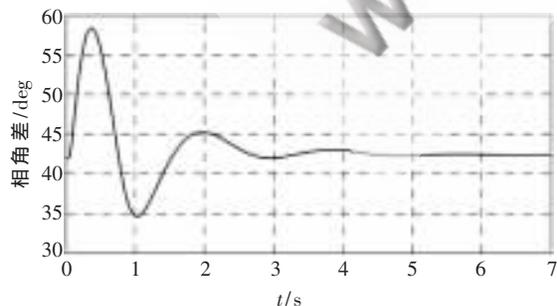
4.2 系统发生故障时的时域仿真

以系统中发生后果最为严重的三相短路接地故障为例,分析 G_1 有功功率和 G_1 、 G_2 转子相角差在采用附加阻尼控制 SVC 情况下的动态响应,其中设置故障时

图5 风电场接入后 G_1 有功功率图6 风电场接入后 G_1 、 G_2 转子相角差

间在 0.02 s 时刻发生, 经历 4 个周波后在 0.1 s 时刻消失。

通过设置三相短路接地故障, 分析附加阻尼控制 SVC 对含风电系统动态过程的影响。由图 7、图 8 可以看出采用阻尼附加控制 SVC 能够在系统发生故障后很快地使转子相角差和有功功率趋于恒定, 改善了系统阻尼, 增强了系统的暂态稳定性。

图7 三相故障后 G_1 有功功率图8 三相故障后 G_1 、 G_2 转子相角差

实验结果证明, 即便在恒定风速情况下(风电场本身无扰动), 基于双馈感应电机的风电场接入系统以后, 会对系统的稳定性产生影响, 如果采用普通 SVC, 经过一

段时间的振荡后系统仍会失去稳定, 甚至崩溃。以功率偏移作为输入量的带有阻尼附加控制功能的 SVC 兼有抑制系统振荡和提供系统电压支持的双重作用, 能够增强风电接入后系统的稳定性。

参考文献

- [1] JAUCH C, SORENSEN P, BAK-JENSEN B. International review of connection requirements for wind turbine[C]. Proceedings of Nordic Wind Power Conference, March 1-2, 2004, Gothenburg, Sweden.
- [2] BOLIKS M. Grid requirements challenges for wind turbines [C]. Proceedings of 4th International Workshop on Large-scale Integration of Wind Power Transmission Networks for Offshore Wind Farms, October 20-21, 2003, Billund, Denmark.
- [3] SHI L, XU Z, HAO J, et al. Modelling analysis of transient stability simulation with high penetration of grid-connected wind farms of DFIG type[J]. Wind Energy, 2007, 10(4):303-320.
- [4] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU X G, et al. Dynamic modeling of doubly-fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2):803-809.
- [5] 石立宝, 戴世强, 徐政. 大规模双馈型风电场并网的系统暂态稳定仿真[J]. 电力系统及其自动化, 2009, 21(8):1-7.
- [6] SENJYU T, SUEYOSHI N. Stability analysis of wind power generating system[C]. Proceedings of The Power Conversion Conference, Apr 2-5, 2002, Osaka, Japan. 2002: 1441-1446.
- [7] HAGSTROM E, NORHEIM I, UHLEN K. Large scale wind power integration in Norway and effect on damping in the Nordic grid[C]. Proceedings of Nordic Wind Power Conference, March 1-2, 2004, Gothenburg, Sweden.
- [8] JAUCH C. Stability and control of wind farms in power systems[D]. Roskilde, Denmark: Ris National Laboratory, Technical University of Denmark, 2006.
- [9] 关宏亮, 迟永宁, 戴慧珠, 等. 并网风电场改善系统阻尼的仿真[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13):81-85.
- [10] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15):10-14.
- [11] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [12] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

(收稿日期: 2010-08-27)

作者简介:

张明光, 男, 1971年生, 教授, 主要研究方向: 电力系统分析、控制理论与控制工程。

刘淼淼, 男, 1986年生, 硕士, 主要研究方向: 风电机组接入后的电力系统稳定性分析。