

一种改进的 SVC 在风电系统霍普夫分岔控制中的应用

袁义桃¹, 康积涛¹, 何 龙²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 运用延拓法追踪以双馈感应风电机组(washout filter DFIG)为代表的风电系统的平衡解流形,并基于分岔理论,分析平衡解流形的分岔点。提出了一种基于高通滤波器(washout filter)技术的 SVC 模型,对风电系统发生的霍普夫(Hopf)分岔进行分岔控制,改变与系统分岔相关的雅可比矩阵特征值,不但消除了 Hopf 分岔点,还提高了电压幅值,扩大了电压稳定裕度。仿真结果和时域仿真验证了所提出的方法是正确可行的。

关键词: 风电系统; 电压稳定; 高通滤波器; SVC; Hopf 分岔

Abstract: Continuation method is used to track the balance flow of power system connected by DFIG, and based on bifurcation theory the bifurcation point of balance flow is also analyzed. A novel SVC model based on washout filter technology is proposed, which is used to control hopf bifurcation, alter the eigenvalue of Jacobian matrix that is related to bifurcation. It not only enhances the voltage amplitude, but also eliminates the hopf bifurcation point and expands the margin of voltage stability. The simulation results and time-domain simulation demonstrate the new approach is correct and feasible.

Key words: wind power system; voltage stability; washout filter; SVC; Hopf bifurcation

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0048-05

0 引言

系统失稳是一个从稳定状态到分岔状态的过程,而分岔理论是分析非线性动态系统稳定的有力工具^[1]。在电力系统中,随着控制参数的变化,易发生分岔现象,而以 Hopf 为代表的动分岔较以鞍结分岔(saddle node bifurcation, SNB)为代表的静分岔提前发生,故 Hopf 分岔决定了系统的电压稳定裕度。

风电并入电网后,由于其自身的特性,对电压稳定影响大,需要无功补偿,电力系统中无功补偿装置虽然提高了系统的电压,但也会使系统发生新的分岔现象,降低系统的稳定裕度。

高通滤波器技术已广泛用于 Hopf 分岔控制^[2-3],它能自动跟踪系统的平衡点,而不改变运行点。目前对于 SVC 的研究,用 washout filter 对其控制来提高电压稳定的文献相对较少。文献[4]对一个单机无穷大系统运用 washout filter 对其进行分岔控制,但是没有 SVC 提供无功补偿。文献[5-6]对一个典型的单机无穷大系统,运用带 washout filter

控制的 SVC 对系统进行无功补偿,但是该模型仅对消除 Hopf 分岔点有效果,而系统电压幅值又变化为系统无 SVC 提供无功补偿时的幅值。基于以上原因,提出了一种带 washout filter 控制的 SVC,不但能够消除系统的 Hopf 分岔点,扩大系统的参数变化裕度,还能够提高系统电压的幅值。

1 研究理论和方法

1.1 分岔理论简介^[7]

非线性电力系统的动态特性一般用一组微分-代数方程(DAE)来描述为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (1)$$

式中 x 代表微分变量; y 代表代数变量; μ 代表控制参数。微分方程组描述同步发电机、DFIG、负荷元件的动态特性;代数方程描述电力系统的网络约束方程。

式(1)表示的系统在平衡点 (x_0, y_0, μ_0) 处满足下列方程组。

$$\begin{cases} 0 = f(x_0, y_0, \mu_0) \\ 0 = g(x_0, y_0, \mu_0) \end{cases} \quad (2)$$

在平衡点 (x_0, y_0, μ_0) 处 将式 (1) 两边进行微分变换得

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = D_x f(x_0, y_0) dx + D_y f(x_0, y_0) dy \\ 0 = D_x g(x_0, y_0) dx + D_y g(x_0, y_0) dy \end{cases} \quad (3)$$

令 $A = D_x f(x_0, y_0)$; $B = D_y f(x_0, y_0)$

$C = D_x g(x_0, y_0)$; $D = D_y g(x_0, y_0)$

经过变换 可将式 (3) 变换为

$$\dot{x} = (A - BD^{-1}C)x \quad (4)$$

令 $J = (A - BD^{-1}C)$ 。

根据动力学知识 系统的动态稳定性可由雅可比矩阵 J 的特征值来确定。根据李亚普诺夫稳定性理论 当系统的特征值实部全部为负时 系统稳定。当特征值出现一零特征值时 系统发生 SN。系统出现一对共轭特征值时 发生 Hopf 分岔。

1.2 延拓法^[8]

延拓法(连续潮流法)用于追踪系统的平衡解流形 是对系统电压稳定性分析的有力工具。它的基本思想是:从初始点开始 随着参数的变化沿相应的平衡解流形曲线对下一点进行预估和校正 直至勾勒出完整的平衡解流形曲线。

每向前追踪一步结束后 使用分岔理论判断系统是否发生分岔 再进行对下一点的追踪。

2 带 washout filter 控制的 SVC 设计

washout filter 控制法是一种状态反馈法 通过引入新的变量 把控制器施加到被控系统 控制器多为原系统某一状态变量和 washout filter 的状态变量构成的多项式。这种控制器不改变原系统的平衡点 控制简单 具有一定的鲁棒性^[9] 易于实现 可利用较小的控制代价实现非线性系统的分岔控制 可应用于高维系统^[3] 因此可将该方法用于电力系统的分岔控制中。washout filter 是一种稳定的高通滤波器 对于一维的情况 它有如下的传递函数。

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{s}{s+d} \quad (5)$$

其中 d 为 washout filter 时间常数的倒数。当 $d > 0$ 时 控制器稳定; $d < 0$ 时 控制器不稳定。根据现代控制原理 由传递函数写出它的状态方程为

$$\dot{w} = x - dw = y \quad (6)$$

其输出方程为

$$\mu = g(y, k) \quad (7)$$

其中 w 为 washout filter 的状态变量; x 为输入的系统变量; y 为输出变量; k 为控制器的增益; μ 为控制器输入到 SVC 的表达式 是一个关于 y 和 k 的函数。当系统稳定时 有 $w = x/d, y = 0$ 相当于输入变量 x 被冲洗掉了 因此被称为滤波器法。

这里采用 SVC 的一阶动态模型 其数学模型如下^[11]。

$$T_{svc} \dot{B} = -B + K_{svc}(U_{ref} - U_7) \quad (8)$$

式中 B 为 SVC 的等值电纳; T_{svc} 为 SVC 的时间常数; K_{svc} 为 SVC 的放大倍数; U_{ref} 为电压参考值; U_7 为输入的被控节点电压。

所提出的带 washout filter 控制的 SVC 模型为

$$T_{svc} \dot{B} = -B + K_{svc}(U_{ref} - U_7) + \mu \quad (9)$$

式中 $\mu = k \cdot (U_7 - d \cdot w)$ 该部分起着消除 Hopf 分岔点的作用 SVC 模型的其他部分起着提高电压幅值的作用。

参数值 d 和 k 值的确定参考文献 [5] 中的方法 在 Hopf 分岔点处求得系统在带 washout filter 控制的 SVC 模型时闭环系统的雅可比矩阵 根据特征值实部为负时 系统稳定 来选取参数值。

3 风电系统模型

3.1 发电机系统模型

同步发电机采用四阶数学模型 模型和参数见文献 [11] 励磁部分采用一阶数学模型 模型和参数见文献 [12]。DFIG 的动态模型采用非线性三阶微分方程描述 模型参数见文献 [13]。

3.2 动态负荷模型

采用第一类动态负荷 (Walve) 模型 参数详细含义见文献 [1]。

$$\begin{cases} P_L = P_0 + P_1 + K_{p\omega} \dot{\theta}_7 + K_{pu}(U_7 + T\dot{U}_7) \\ Q_L = Q_0 + Q_1 + K_{qu} \dot{\theta}_7 + K_{qu} U_7 + K_{qu2} U_7^2 \end{cases} \quad (11)$$

3.3 网络约束模型

对于同步发电机节点和非发电机节点的网络约束方程见文献 [12] 对于 DFIG 节点 将其处理为一个 PQ 节点 DFIG 注入系统的功率即 DFIG 与系统的接口为

$$\begin{cases} P = \frac{E' |U|}{X'} \sin(\delta_0 - \theta) \\ Q = \frac{E' |U| \cos(\delta_0 - \theta) - |U|^2}{X'} \end{cases} \quad (15)$$

4 算例分析

4.1 风电系统描述

这里采用 3 机 9 节点系统, 简化模型如图 1, 节点 2 处为同步发电机, 节点 3 处为 DFIG, 节点 7 处接入动态负荷和 SVC, 节点 5、9 为恒功率负荷, 节点 1 为系统平衡节点。

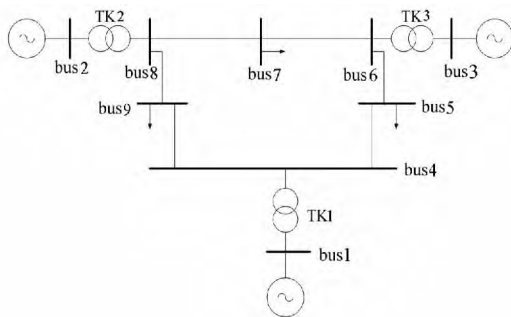


图 1 含 DFIG 的电力系统

SVC 参数: $T_{SVC} = 0.6$; $K_{SVC} = 10$; $U_{ref} = 1$; $d = 7$; $k = 72$ 。

4.2 仿真分析

下面就对 3 机 9 节点系统在没有 SVC 进行无功补偿、带 washout filter 控制的 SVC (即文献 [5-6] 中的 SVC 模型)、所提出的带 washout filter 控制的 SVC 模型分别随动态负荷控制参数 Q_1 变化, 利用延拓法进行分岔仿真分析, U_7 为节点 7 的电压幅值, HP 表示 Hopf 分岔点, SNB 表示鞍结分岔点。

4.2.1 无 SVC 补偿

图 2 为系统在无 SVC 提供无功补偿的情况下, 系统的 QV 曲线, 系统在 $Q_1 = 1.1864$ 处发生 Hopf 分岔。

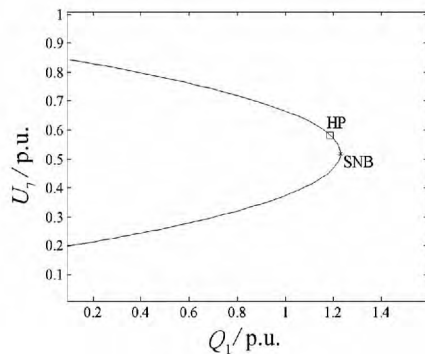


图 2 无 SVC 补偿的 QV 曲线

4.2.2 不带 washout filter 控制的 SVC 分岔分析

图 3 为系统在 SVC 无 washout filter 控制情况下的 QV 曲线, 与图 2 相比, 由 SVC 给系统提供的无功使系统电压幅值得到提高, 同时系统在 $Q_1 = 3.2062$ 处发生 Hopf 分岔, 比图 2 中的 $Q_1 = 1.1864$ 稳定裕度扩大了。从图 4 在 Hopf 分岔点的时域仿真同样可以验证由分岔理论得到的分岔点的正确性。

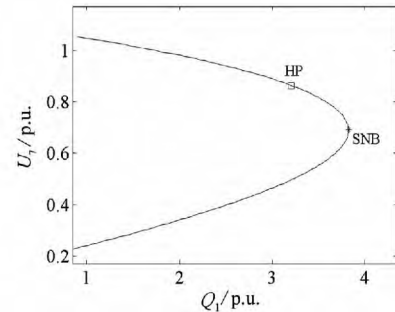
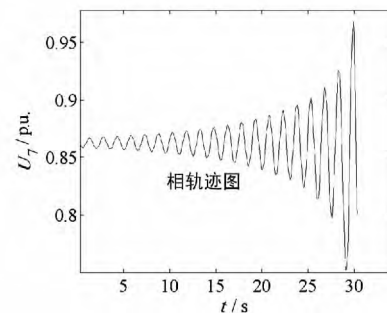
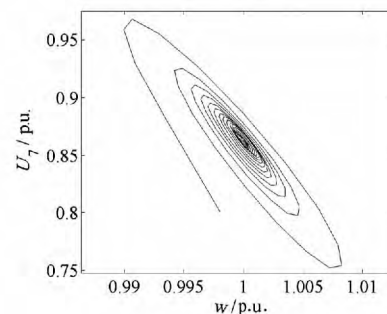


图 3 无 washout filter 控制的 SVC 的 QV 曲线



(a) $u(t)$ 曲线



(b) $u-w$ 相轨迹图

图 4 无 washout filter 的 SVC 时的时域仿真

4.2.3 带 washout filter 控制的 SVC

图 5 为系统在 SVC 用文献 [5-6] 提出的 washout filter 控制模型情况下的 QV 曲线。由图可得, 通过引入该 SVC 模型确实消除了系统的 Hopf 分岔点, 但同时和图 2 相比, 两者的 QV 曲线一样, 即在同一控制参数值 Q_1 下的节点电压 U_7 幅值相同, 也即是说, 该 SVC 模型下系统的电压幅值降低了, 控制参数的稳定裕度变小了。

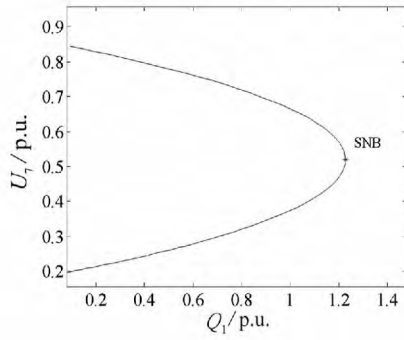


图 5 washout filter 控制的 SVC 的 QV 曲线

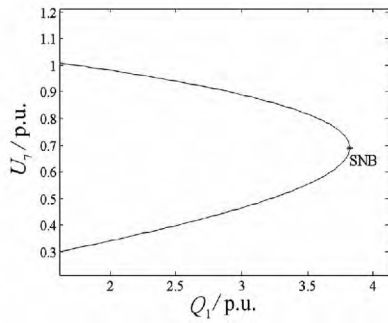
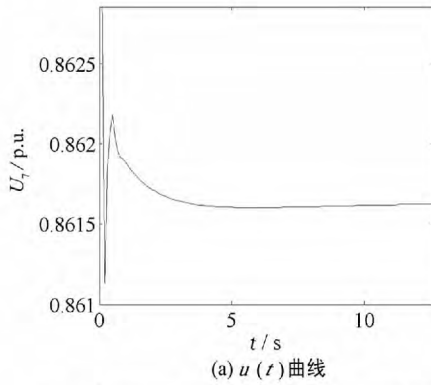
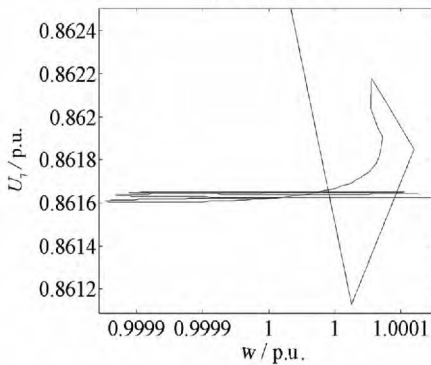


图 6 所提出的一种新的 washout filter 控制的 SVC 的 QV 曲线



(a) $u(t)$ 曲线



(b) $u-w$ 相轨迹图

图 7 新的 washout filter 控制的 SVC 时系统的时域仿真

4.2.4 带 washout filter 控制的 SVC 分岔分析

图 6 为系统在所提出的带 washout filter 控制的 SVC 模型时的分岔分析。与图 3 相比,该 SVC 模型

不但保持了原来 QV 曲线形状,电压幅值并没有降低,同时也消除了系统的 Hopf 分岔,使系统的稳定裕度得到提高,与图 5 下的模型仅消除分岔点而系统稳定裕度降低相比,所提出的模型显然更具有优势。在图 3 中,在 $Q_1 = 3.2062$, $U_1 = 0.8620$ 处出现 Hopf 分岔,在该点进行时域仿真,系统不稳定而发散。但在图 7 中同样参数下,由于消除了分岔点,出现扰动时,系统的电压随时间趋于稳定值, $u-w$ 相轨迹趋于稳定收敛,由时域仿真可验证该模型是正确可行的。

5 结 语

当电力系统无功不足时,电压降低,SVC 为系统补偿无功可以提高系统电压幅值。前面以动态负荷无功为参数,基于分岔理论和延拓法,首先分析了含双馈感应风电机的电力系统在没有 SVC 提供无功补偿下的 QV 曲线,然后分析了 SVC 在两种控制情况下时系统的 QV 曲线。在文献 [5-6] 中 washout filter 控制下的 SVC 只能消除分岔点,但这是以降低系统电压幅值和稳定裕度为代价的。所提出的 washout filter 控制下的 SVC 模型,在同样的系统参数下,不但可以消除分岔点,稳定裕度得到提高,还可以提高系统的电压幅值,通过时域仿真验证表明所提出的带 washout filter 控制的 SVC 模型是正确可行的。

参考文献

- [1] Lerm, A. A. P. Multiparameter Bifurcation Analysis of the South Brazilian Power System [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2003, 18(2): 737-746.
- [2] Le Hoa Nguyen, Keum-Shik Hong. Analysis and Control of the Bifurcation in a Morris-Lecar Neuron via a Washout Filter-Aided Dynamic Control Law [C]. 11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) 2011: 342-347.
- [3] Dong Chen, HUA O. Wang. Anti-control of Hopf Bifurcations Through Washout Filters [C]. Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, 1998 (3): 3040-3045.
- [4] 马幼捷, 李小双, 周雪松, 等. 基于高通滤波器技术的电力系统霍普分岔控制 [J]. 电网技术, 2011, 35(7): 76-80.

[5] Saad, M. S. Hassouneh, M. A. Abed, E. H. Edris, A. Delaying Instability and Voltage Collapse in Power Systems using SVCs with Washout Filter – aided Feedback [C]. Proceedings of the 2005 Digital Object Identifier American Control Conference, 2005(6): 4357 – 4362.

[6] 安诗春. 非线性电力系统分岔控制的研究[D]. 沈阳: 东北大学 2008.

[7] 彭志炜, 胡国根, 韩祯祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 中国电力出版社 2005.

[8] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 91 – 96.

[9] Calandririni G, Paolini E, Moiola J L. Controlling Limit Cycles and Bifurcation in Controlling Chaos and Bifurcations in Engineering Systems [C]. 1999: 200 – 227.

[10] K. N. Srivastava, S. C. Srivastava, P. K. Kalar. . Chaotic

Oscillation in Power System Under Disburbance [C]. In IEE 2nd International Conference on Advances in Power Control, Operation and Management, Hong Kong, 1993: 705 – 711.

[11] 李康. 基于分岔理论的电力系统动态电压稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学 2012.

[12] 顾伟. 电力系统最优分岔控制研究[D]. 南京: 东南大学 2006.

[13] K. Elkington, V. Knazkins and M. Ghandhari. On the Stability of Power Systems Containing Doubly fed Generator based Generation [J]. Electr. Power System, 2008, 78(9): 1477 – 1484.

作者简介:

袁义桃(1987), 硕士研究生, 主要研究方向为风电系统的电压稳定性分析。

(收稿日期: 2013 – 12 – 27)

=====

(上接第 18 页)

(1) 设计的 3 个次同步阻尼控制器都可以达到抑制 SSO 的目的, 也就是说在轴系扭振模态频率处电气阻尼转矩系数为正就可以抑制次同步振荡。

(2) 如果可以使整个频段的电气阻尼转矩系数为正, 发生次同步振荡后施加抑制装置时发电机各机械量和系统中电气量起始振荡幅值更小, 恢复到平衡位置的时间更短, 对发电机轴系的疲劳损伤最小, 对系统中电气设备的危害也越小。

参考文献

[1] 张运洲, 张卫东. 国家电网公司电网“十一五”发展规划综述[N]. 国家电网报, 2006 – 36 – 38(1).

[2] 周孝信, 郭剑波, 林集明, 等. 电力系统可控串联电容补偿[M]. 北京: 科学出版社 2009.

[3] Hsu YY, Jeng I H. Analysis of Torsional Oscillations Using Anartificial NeuRal network [J]. IEEE Trans. on EC, 1992, 7(4): 684 – 690.

[4] 陈陈. 多变量频域法分析电力系统次同步振荡[J]. 电力系统自动化, 1989 (5): 22 – 27.

[5] 于达仁, 徐基豫. 大型汽轮机调节系统的设计对轴系扭振

的影响[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(4): 35 – 39.

[6] YY. Hsu and L. Wang. Modal Control of an HVDC System for the Damping of Subsynchronous Oscillations [J]. IEE Proceedings, 1989, 136(2): 78 – 86.

[7] R. J. Piwko, E. VLarsen. HVDC system control for damping of subsynehonous Oscillations [J]. IEEE Transctionson Power Apparatus and Systems. 1982, 101(7): 2203 – 2211.

[8] 江全元, 程时杰, 曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计 [J]. 中国电机工程学报, 2005(1): 87 – 91.

[9] 杨秀, 王西田, 陈陈. 基于 H_{∞} 鲁棒控制理论的高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制设计 [J]. 电网技术, 2006, 30(9): 57 – 61.

[10] Padiyar K R. Analysis of Subsynchronous Resonance in Power Systems [M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1999: 87 – 96.

作者简介:

王敏华(1988), 硕士, 研究方向为电力系统的稳定与控制。

(收稿日期: 2014 – 02 – 04)