

静止无功补偿系统非线性最优控制器设计

黄峰

(南通供电公司,江苏南通 226006)

摘要:静止无功补偿器(SVC)对改善电力系统的安全稳定性具有重要意义。在静止无功补偿系统(SVS)控制原理的基础上,基于精确反馈线性化和非线性最优理论设计了静止无功补偿系统非线性最优控制器,并通过算例仿真与常规控制方式进行对比,证明了非线性最优控制器的优越性。

关键词:静止无功补偿器;精确反馈线性化;非线性最优理论

中图分类号:TM761

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)05-0058-04

电力系统是一个高度非线性的大系统,随着电力工业的迅速发展,电力系统单机容量不断增加,电网结构日益复杂和庞大,稳定性问题极为突出。长期以来,人们对如何利用发电机及其各种调节器改善电力系统的安全稳定性进行了大量的研究工作^[1]。随着电力电子技术的迅速发展,静止无功补偿器(SVC)越来越广泛地应用于电力系统,由于SVC具有突出的控制快速性,因此,深入研究SVC的控制规律在改善电力系统稳定性中的作用具有重要意义。文献[2,3]利用精确线性化方法设计SVC控制规律;文献[4]把直接反馈线性化理论应用到SVC控制器的设计中,并取得了良好的控制效果。文中基于非线性最优控制理论对静止无功补偿系统(SVS)进行了精确反馈线性化,并基于线性化后的模型设计了最优控制器,通过对比常规控制方式和非线性最优控制器对一单机无穷大系统发生三相短路时的控制效果,验证了该非线性最优控制器的优越性。

1 SVC 控制原理

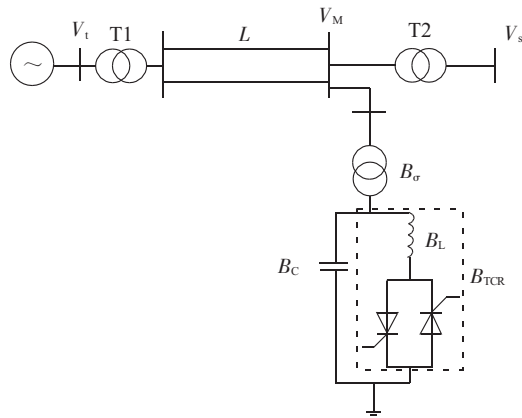
单机无穷大系统中的线路末端接入TCR-FC型SVS补偿装置,其原理接线和相应的等值电路如图1所示。

发电机的转子运动方程式可写为:

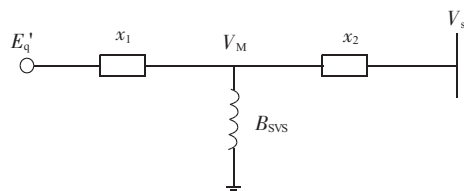
$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) - \omega_0 \\ \dot{\omega}(t) = \frac{\omega_0}{H} P_m - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} P_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为发电机转子运行角; ω 为发电机转速; P_m 和 P_e 分别为发电机机械功率和电磁功率; H 为机组转动惯量; D 为阻尼系数。

若略去线路与SVS装置的电磁暂态过程,则由图1(b)可得发电机电磁功率为:



(a) 原理接线



(b) 等值电路

图1 具有SVS的单机无穷大系统

$$P_e = \frac{E_q' V_s}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 B_{SVS}} \sin \delta \quad (2)$$

式中, E_q' 为发电机暂态电势; δ 为发电机功角; x_1, x_2 为图1(b)中的线路电抗; V_s 为无穷大母线电压; B_{SVS} 为SVS等效电纳,即文中的控制变量。

进一步假设发电机暂态电势和机械功率恒定,则具有SVS的单机无穷大系统可以用以下非线性状态方程式表示:

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) - \omega_0 \\ \dot{\omega}(t) = \frac{\omega_0}{H} P_m - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} \frac{E_q' V_s}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 B_{SVS}} \sin \delta \end{cases} \quad (3)$$

1.1 常规控制方式

1.1.1 控制原理

将SVS用图2所示的等值电路表示。

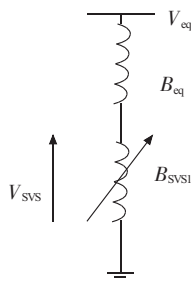


图2 接入 SVS 的等值电路

由图可知,加在 SVS 上的电压可表示为:

$$V_{SVS} = \frac{V_{eq}}{1 + \frac{B_{SVS1}}{B_{eq}}} \quad (4)$$

式中, B_{SVS1} 为加装消谐滤波装置(FC)的晶闸管控制电抗器(TCR)型 SVS 补偿装置等效电纳,其表达式如下^[5]:

$$B_{SVS1} = (1 - \frac{B_C}{B_{eq}})B_C + (1 - \frac{2B_C + B_L}{B_{eq}})B_{TCR} \quad (5)$$

式中: B_{TCR} 为 TCR 等效电纳,即 TCR-FC 型 SVS 补偿装置的可控变量,通过控制 B_{TCR} 即可实现具体的控制指令。

如果系统等值电纳 $B_{eq} \geq B_{SVS1}$, 则可控电抗器上的电压可近似表示为:

$$V_{SVS} = V_{eq} (1 - \frac{B_{SVS1}}{B_{eq}}) \quad (6)$$

当 SVS 处于断开状态时,其电纳 $B_{SVS1} = 0$ 。由式(4)或(6)可知,此时 SVS 两端电压 V_{SVS} 应等于系统电压 V_{eq} 。所以 SVS 两端电压变化(亦即系统电压变化) ΔV 应为:

$$\Delta V = V_{SVS}(B_{SVS1}) - V_{SVS}(B_{SVS1} = 0) = -\frac{B_{SVS1}}{B_{eq}} V_{eq} \quad (7)$$

若定义式(7)中静止无功补偿器控制系统的增益为:

$$K_N = -\frac{V_{eq}}{B_{eq}} \quad (8)$$

则系统电压增量可表示为:

$$\Delta V = K_N B_{SVS1} \approx V_{eq} - V_{REF} \quad (9)$$

式中: V_{REF} 为 SVS 接入点的系统电压指令值。控制系统增益 K_N 依赖于等值电路的参数 V_{eq} 和 B_{eq} , 而 V_{eq} 和 B_{eq} 随系统结构和运行方式的变化而改变。

以 TCR-FC 型 SVS 装置为例,最基本的控制方式如图 3 所示。

1.1.2 控制规律的求解

对于图 1 所示的单机无穷大系统, $V_{eq} = V_M$, $B_{eq} = B_\sigma$ 。由图 1(b)等值电路图可得:

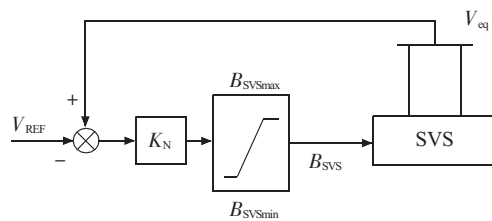


图3 TFR-FC 型 SVS 基本控制方式的闭环系统

$$V_M = \frac{\sqrt{(E_q' x_2 \cos \delta + x_1 V_s)^2 + (E_q' x_2 \sin \delta)^2}}{x_1 + x_2 - x_1 x_2 B_{SVS}} \quad (10)$$

由图 2 的等值电路可得:

$$B_{SVS} = \frac{B_{SVS1} B_\sigma}{B_{SVS1} + B_\sigma} \quad (11)$$

因为可控硅触发角可在 180° 和 90° 连续变化,所以 B_{TCR} 可在 0 与 B_L 之间连续变化,分别对应着 B_{SVS} 的最大值和最小值。 B_{SVSmax} 与 B_{SVSmin} 的计算方法详见文献[5]。

联立式(8),(9),(10),(11)可得控制规律如下:

$$\begin{cases} V_M = \frac{1}{2x_1 x_2 k} [U + \\ \sqrt{U^2 - 4x_1 x_2 k \sqrt{(E_q' x_2 \cos \delta + x_1 V_s)^2 + (E_q' x_2 \sin \delta)^2}}] \\ B_{SVS} = B_\sigma - \frac{V_M}{V_{REF}} B_\sigma \end{cases} \quad (12)$$

式中: $U = x_1 x_2 k V_{REF} + x_1 + x_2$; $k = -B_\sigma / V_{REF}$ 。

1.2 非线性最优控制方式

对于式(3)选择控制量为:

$$u = \frac{1}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 B_{SVS}} \quad (13)$$

则式(3)可以写成以下仿射非线性系统形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) \\ (\omega - \omega_0) \end{bmatrix} \\ g(x) = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_0}{H} E_q' V_s \sin \delta \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

根据文献[5]中的精确线性化方法可将上述系统精确线性化为以下系统:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = v \end{cases} \quad (15)$$

上式线性系统满足二次型性能指标的最优控制规律为:

$$v^* = -k_1 z_1 - k_2 z_2 = -k_1 \Delta \delta - k_2 \Delta \omega \quad (16)$$

若取二次型性能指标中 $Q = \text{diag} [1, 0]$, $R = 1.0$,

则 $k_1=1.0, k_2=\sqrt{2}$ 。由此求出系统(14)的非线性控制规律为:

$$u = \frac{-P_m + \frac{H}{\omega_0} \Delta\delta + \frac{H}{\omega_0} (-\Delta\delta - \sqrt{2} \Delta\omega)}{E_q' V_s \sin \delta} \quad (17)$$

上述控制规律使得以下二次型性能指标最优:

$$J = \int_0^{\infty} (q_1 \Delta\delta^2 + q_2 \Delta\omega^2 + r_0 \frac{\omega_0^2}{H} \Delta P_e^2) dt \quad (18)$$

式中: q_1, q_2 和 r_0 分别为 Q 和 R 的对角元。

上述指标的被积函数中第一项为 $\Delta\delta^2$, 期望目标是转子角偏差平方最小; 第二项为 $\Delta\omega^2$, 期望目标是频率偏差平方最小; 第三项为 ΔP_e^2 , 期望目标是电磁功率振荡最小。综上所述, 指标 J 的最优性体现在功角稳定和频率稳定, 包含了对系统动态品质的多目标优化要求。

将式(17)代入式(13)可得对 SVS 电纳的非线性最优控制规律:

$$B_{SVS} = \frac{E_q' V_s \sin \delta - (x_1 + x_2) (P_m + \frac{H}{\omega_0} \Delta\delta + \frac{H}{\omega_0} \sqrt{2} \Delta\omega)}{x_1 x_2 (P_m + \frac{H}{\omega_0} \Delta\delta + \frac{H}{\omega_0} \sqrt{2} \Delta\omega)} \quad (19)$$

SVS 非线性最优控制器的实现框图见图 4。

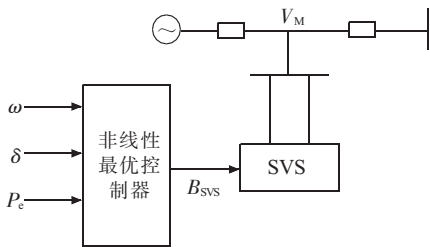


图4 SVS 非线性最优控制器的实现框图

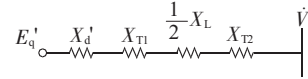
2 算例仿真

对一单机无穷大系统算例进行仿真, 对比系统发生三相短路时常规控制方式和非线性最优控制方式的频率和功角稳定性。

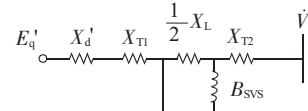
2.1 算例参数和状态模型的推导

给定一个单机无穷大系统, 其等值电路如图 5 所示。采用文献[6]中的参数数据。已知: $X_d'=0.238$, $X_{T1}=0.13$, $\frac{1}{2}X_L=0.293$, $X_{T2}=0.108$, $\dot{V}_s=1 < 0$, $P_m=1.0$, $H=66.67$, $D=20$, $\omega_0=314.15$ rad/s。输电线路始端在 $t=1$ s 时发生三相短路, 0.1 s 后切除故障。求得正常运行时的平衡点为 $E_q'=1.47, \delta_0=31.54^\circ$ 。

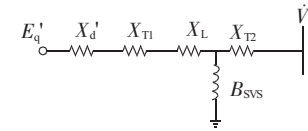
(1) 正常运行状态。如图 5(a)所示, 系统正常



(a) 正常运行状态



(b) 故障期间



(c) 故障切除后

图5 系统的等值电路

运行时, $B_{SVS}=0, x_1=X_d'+X_{T1}+\frac{1}{2}X_L, x_2=X_{T2}$, 此时发

电机的电磁功率 $P_e = \frac{E_q' V_s}{x_1 + x_2} \sin \delta$ 。

(2) 故障中。如图 5(b)所示, 发生三相短路故障时, $P_e=0$ 。

(3) 故障切除后。如图 5(c)所示, 故障切除后, 系统变为单回路供电。 $x_1'=X_d'+X_{T1}+X_L, x_2'=X_{T2}$, 此

时发电机电磁功率 $P_e = \frac{E_q' V_s}{x_1' + x_2' + x_1' x_2' B_{SVS}} \sin \delta$ 。式中

B_{SVS} 为控制量, 由不同的控制方式得出。

改变各状态的电磁功率的表达式可以求得各状态的状态方程。

2.2 2种控制方法的比较

采用常规控制和非线性最优控制 2 种方式对 SVS 装置的电纳进行控制。根据 1.1 和 1.2 所述原理并代入算例参数求得控制规律, 然后用 Matlab 编程仿真。2 种方式频率和功角稳定性的对比如图 6 所示。

由图 6 可知, 系统 1.0 s 时发生三相短路故障, 在常规控制方法的作用下故障后系统发生振荡, 控制效果并不理想。而在非线性最优控制器的控制下, 切除故障后系统在 6 s 时恢复到原来的稳定状态。频率和功角只经过一次振荡即达到稳定状态, 达到了最优控制频率和功角振荡最小的目标。

可见, 非线性最优控制器的优势为: (1) 频率和功角振荡较小, 并能够使系统稳定; (2) 超调较小; (3) 比常规控制较快达到稳定状态并且能回到原来的平衡点。

文中设计的基于精确反馈线性化的 SVS 非线性最优控制器对多机电力系统同样适用, 其设计过

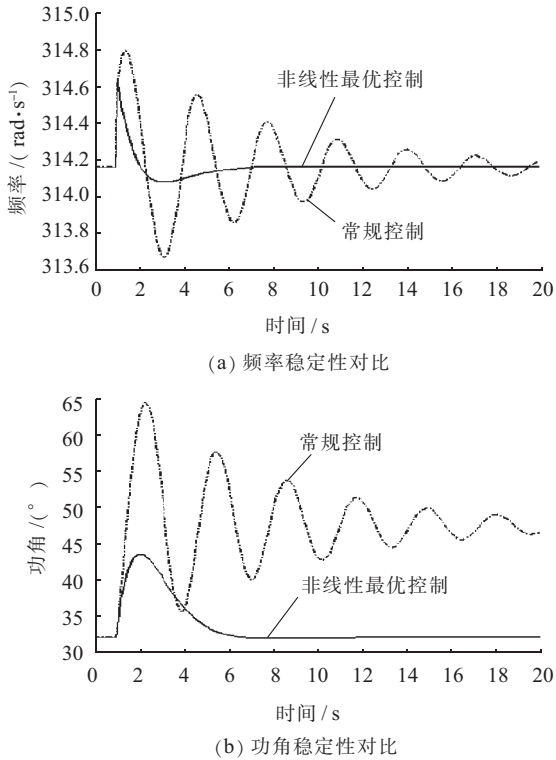


图6 2种控制方式的频率和功角比较

程与单机系统类似,通过联立发电机转子状态方程与网络方程,获得包含SVS等效电纳的状态方程,将SVS等效电纳作为控制变量,运用精确反馈线性

化和最优控制理论设计控制律,即可得到多机电力系统静止无功补偿装置非线性最优控制器。

3 结束语

综上所述,SVS的非线性最优控制器在频率和攻角稳定性方面均优于常规控制方式。随着静止无功补偿装置在电力系统中的大量应用,对SVS的控制策略也需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 张敏,刘孙贤,李新君,等.包含静止无功补偿器的电力系统非线性控制研究[J].电气应用,2007,26(4):30-34.
- [2] 卢强,孙元章.电力系统非线性控制[M].北京:科学出版社,1993.
- [3] 阎彩萍,孙元章,卢强.用精确线性化方法设计的SVC非线性控制器[J].清华大学学报,1993,33(1):18-24.
- [4] 马幼捷,周雪松.静止无功补偿器非线性控制对系统功角稳定的影响[J].中国电机工程学报,2003,23(12):84-88.
- [5] 卢强,梅生伟,孙元章.电力系统非线性控制[M].2版.北京:清华大学出版社,2008.
- [6] 何仰赞,温增银.电力系统分析[M].3版.武汉:华中科技大学出版社,2002.

作者简介:

黄峰(1976),男,江苏南通人,工程师,从事电网运行管理工作。

Design of Nonlinear Optimal Controller for Static Reactive Power Compensation System

HUANG Feng

(Nantong Power Supply Company, Nantong 226006, China)

Abstract: Static var compensator plays an important role in improving the security and stability of power system. On the base of the control theory, nonlinear optimal controller for static reactive power compensation system is designed through exact feedback linearization and nonlinear optimization theory. The designed controller is simulated in an example and then compared with conventional control method. The result shows the designed nonlinear optimal controller is superior to the conventional controller.

Key words: static var compensator; exact feedback linearization; nonlinear optimization theory

(上接第57页)

力需求侧管理,2009,11(1):17-19.

- [4] 袁飞,肖晶,卢毅.基于人体舒适度指数的夏季负荷特性分析[J].江苏电机工程,2005,24(6):5-7.

作者简介:

许琦(1980),女,江苏南京人,工程师,从事电力调度工作;
曾凌(1981),女,江苏南京人,工程师,从事自动化运维工作。

Analysis on Load and Temperature Sensitivity of Nanjing Grid

XU Qi, ZENG Ling

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: The climate change has more impacts on load year by year, as well as on accuracy of power system load forecasting. 2011 full-year load level of Nanjing grid is analyzed in detail. The air conditioning load of Nanjing in summer and winter is calculated based on relationship between daily maximum load and temperature. The sensitivity coefficient of highest load and temperature is obtained which provides an effective reference to improve Nanjing load forecasting accuracy.

Key words: load forecasting; grid load; air conditioning load; temperature; sensitivity