

相间功率控制器抑制低频振荡的研究

刘修宽, 蒋维勇, 周苏荃, 王 祁, 柳 焯

(哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在分析相间功率控制器 IPC (Interphase Power Controller) 稳态电路模型的基础上建立了含 IPC 电力系统线性化数学模型, 并以此模型为基础分析了 IPC 向系统提供转矩的途径和性质。分析表明, IPC 本身不能向系统提供阻尼转矩, 但会向系统提供负的同步转矩, 不利于系统的同步稳定运行。采取合理的控制策略调节 IPC 参数, 可以增加系统的同步转矩和阻尼转矩, 保证系统的同步运行, 使系统的振荡得到平息, 提高系统稳定性。

关键词: 灵活交流输电; 相间功率控制器; 低频振荡

中图分类号: TM 76; TM 713

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)01-0001-04

0 引言

大区域电网互联, 导致整个电力系统的总装机容量大, 但由于网间联系薄弱, 使得各电网的静态、暂态和动态性能发生较大的变化, 各系统的阻尼特性受到的影响更大, 在互联的一方或双方电网间可能发生低频振荡, 对系统的稳定运行造成了危害^[1-2]。

低频振荡是一种机电自由振荡, 内在原因是系统缺乏阻尼。因而抑制低频振荡的关键是增加系统的阻尼, 目前主要通过电力系统稳定器 (PSS) 实现, 由于 PSS 装设位置的确定和参数整定比较困难, 实现过程相对复杂。FACTS 技术的发展为向系统增加阻尼提供了新的方法, 利用 TCSC, SVC, TCPS 等 FACTS 装置阻尼系统低频振荡的研究已经广泛展开并取得了一定的效果^[3-6]。

相间功率控制器 IPC (Interphase Power Controller) 作为一种新型的 FACTS 装置在增加线路传输功率、增强线路潮流可控性、限制事故电流等方面具有许多良好特点。国外, IPC 已在实际工程中发挥作用; 国内, 针对 IPC 的理论进行了多方面的探讨和研究, 但主要集中于 IPC 稳态性能方面的研究^[7-8], 对其机电暂态特性的研究相对薄弱。IPC 对电力系统暂态和动态稳定性能的影响是 IPC 研究的一个重要方向。

1 含 IPC 多机电力系统数学模型

电力系统常规动态分析模型的思路是: 将各发电机的机端电压、电流的增量方程组与网络增量方程组联立求解得到机端电压、电流的增量与系统状态变量的关系式, 将这个关系式代入发电机的微分

方程组, 得到只含系统状态变量的状态方程组, 从而得到用于动态分析的多机系统数学模型。

1.1 含调谐型 IPC 的网络导纳矩阵

根据接线方式及电感电容参数配置的不同, IPC 可以分为多种类型, 各种类型的 IPC 特性有所不同, 但基本性能相似, 即当 IPC 两端电压相位差 δ_{IPC} 在 $[-25^\circ, 25^\circ]$ 时, IPC 输送有功功率保持稳定、一侧系统发生故障对另一侧系统几乎没有影响等。图 1 分别给出了 IPC 送端 A 相和受端 A 相接线图, 其他两相连接方式类似。由图 1 可知, IPC 主电路中仅含电容和电感等传统的线性器件, 因而它对电力系统的作用可归纳到网络导纳矩阵中。对于调谐型 IPC, 阻抗 $X_{IPC} = \omega L = 1/(\omega C)$; 导纳 $b_{IPC} = 1/(\omega L) = \omega C$ 。

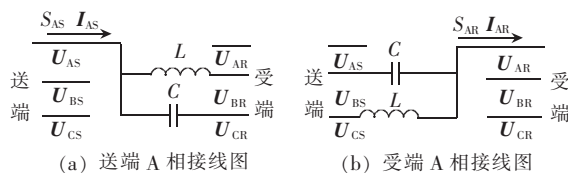


图 1 IPC 电路模型

Fig.1 Model of IPC circuit

IPC 为串联 FACTS 装置, 需串联在输电线路中工作。以系统中某一条输电线路的首端装设 IPC 为例分析含 IPC 电力系统导纳矩阵, 线路各量见图 2。

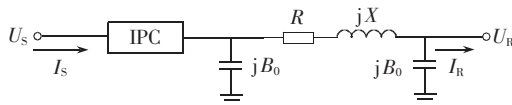


图 2 含 IPC 输电线路示意图

Fig.2 A transmission line with IPC

由图 1, 2 可得含 IPC 线路的电压、电流关系式:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CA^{-1}C & -CA^{-1}B \\ BA^{-1}C & A-BA^{-1}B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} G & -B-B_0 \\ B+B_0 & G \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -G & B \\ -B & -G \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} b_{IPC} & 0 \\ 0 & b_{IPC} \end{bmatrix}$$

上式具有导纳矩阵的形式,可简记为

$$\begin{aligned} I &= Y_{IPC} U \\ I &= [I_S \quad I_R]^T, \quad U = [U_S \quad U_R]^T \\ Y_{IPC} &= \begin{bmatrix} CA^{-1}C & -CA^{-1}B \\ BA^{-1}C & A-BA^{-1}B \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

当对 IPC 进行控制,且在控制过程中保持 IPC 电容和电感支路的阻抗共轭,则 Y_{IPC} 中各量均为 b_{IPC} 的函数,通过对 IPC 参数的调节可改变线路电压、电流关系,从而改变传输功率。根据式(1),IPC 参数发生的变化可以表现为导纳矩阵元素的变化,这是分析可控 IPC 对系统转矩影响的基础。

1.2 含 IPC 多机系统线性化数学模型

在含 IPC 多机系统数学模型的建立过程中,发电机采用三阶实用模型,计及励磁系统动态及发电机凸极效应,励磁系统为静止励磁系统并采用一阶惯性环节描述,可得:

$$\begin{aligned} p\Delta\delta &= \Delta\omega \\ p\Delta\omega &= (-K_1\Delta\delta - D\Delta\omega - K_2\Delta E'_q - \\ &\quad K_R\Delta B_{IPC} - K_P\Delta b_{IPC})\tau_M^{-1} \\ p\Delta E'_q &= (-K_4\Delta\delta - K_3\Delta E'_q + \Delta E_f - \\ &\quad K_S\Delta B_{IPC} - K_Q\Delta b_{IPC})\tau_{d0}'^{-1} \\ p\Delta E_f &= (-K_E K_5\Delta\delta - K_E K_6\Delta E'_q - \\ &\quad K_E K_T\Delta B_{IPC} - K_E K_V\Delta b_{IPC} - \Delta E_f)\tau_E^{-1} \\ K_1 &= I_{q0}(X_q - X_d')F_d + [E'_{q0} + I_{d0}(X_q - X_d')]F_q \\ K_2 &= I_{q0} + I_{q0}(X_q - X_d')Y_d + [E'_{q0} + I_{d0}(X_q - X_d')]Y_q \\ K_3 &= E + (X_d - X_d')Y_d \\ K_4 &= (X_d - X_d')F_d \\ K_5 &= (X_d - X_d')B_d \\ K_6 &= U_{i0}^{-1}(U_{id0}X_qY_q - U_{iq0}X_d'Y_d + U_{iq0}) \\ K_R &= E'_{q0}B_q + I_{d0}(X_q - X_d')B_q + I_{q0}(X_q - X_d')B_d \\ K_P &= E'_{q0}C_q + I_{d0}(X_q - X_d')C_q + I_{q0}(X_q - X_d')C_d \\ K_Q &= (X_d - X_d')C_d \\ K_S &= U_{i0}^{-1}(U_{id0}X_qF_q - U_{iq0}X_d'F_d) \\ K_T &= U_{i0}^{-1}(U_{id0}X_qB_q - U_{iq0}X_d'B_d) \\ K_V &= U_{i0}^{-1}(U_{id0}X_qC_q - U_{iq0}X_d'C_d) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 δ 为发电机转子摇摆角; ω 为发电机转子角速度; τ_M 为发电机转子的惯性时间常数; D 为发电机阻尼转矩系数; τ_{d0}' 为发电机励磁绕组定子开路时的时间常数; E'_q 为发电机暂态电势; E_q 为发电机空载电势; E_f 为发电机励磁电势; τ_E 为励磁系统时间常数; K_E 为励磁系统放大倍数。

上式是采有 $d-q$ 坐标系下系统线性化数学模型,可得到含 IPC 多机系统传递函数见图 3(虚线部

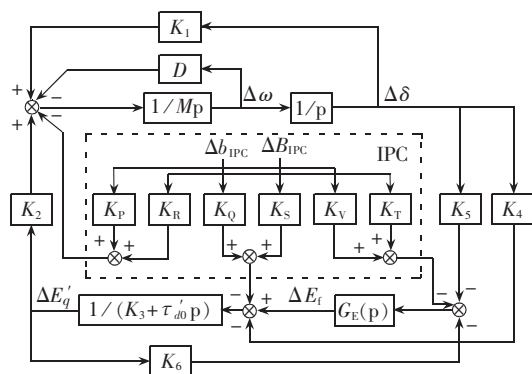


图 3 含 IPC 多机系统数学模型

Fig.3 Model of multi-machine power system with IPC

分为 IPC 及其控制系统对传递函数结构影响。

2 IPC 向系统提供转矩的分析

为了分析 IPC 对电力系统低频振荡的具体影响情况,必须对转矩的具体性质进行分析。IPC 的引入往往会引起系统运行状态的较大变化,导致系统的振荡模式发生变化。因而,首先要分析 IPC 的引入对系统振荡模式的影响,在此基础上分析当采用控制手段对 IPC 的参数进行调节时 IPC 向系统提供转矩的性质,确定具体可以向系统提供足够正阻尼转矩的 IPC 参数控制策略。

2.1 可控 IPC 的传递函数

首先,确定不含 IPC 参数控制时,IPC 对系统转矩的影响,当 IPC 两端电压相位角发生变化,就相当于系统根据相位角对 IPC 等值阻抗进行了实时的控制,即认为控制过程没有时间滞后,该控制过程可以用一个简单的比例环节表示:

$$\Delta B_S = -\sqrt{3} b_{IPC} \cos \delta_{IPC0} \Delta \delta_{IPC} \quad (4)$$

以转速($\omega_0 \Delta \omega$)作为低频振荡阻尼控制的输入,对 IPC 参数进行控制,由于存在控制过程和 IPC 参数的惯性滞后,IPC 电容、电感到达稳态存在过渡过程,IPC 的参数特性可以用一阶惯性环节描述:

$$\Delta b_{IPC} = \frac{K_D}{1 + s\tau_{IPC}} \omega_0 \Delta \omega \quad (5)$$

式中 K_D 为阻尼控制的放大倍数; $s = j\omega_s$; τ_{IPC} 为 IPC 本身和阻尼控制系统惯性时间常数之和。

IPC 对系统振荡的影响可以归结为 IPC 向系统提供转矩的大小和性质,IPC 向系统提供电磁转矩可用下式表示:

$$\Delta T = (T_s + j\omega_s T_D) \Delta \delta \quad (6)$$

式中 T_s 为同步转矩系数; T_D 为阻尼转矩系数; ω_s 为低频振荡角频率。

当采用发电机功率角($\delta_0 \Delta \delta$)作为控制变量,还可以使 IPC 向系统提供足够的同步转矩。IPC 本身的惯性及同步转矩控制的惯性也可用一阶惯性放大环节表示:

$$\Delta b_{IPC} = \frac{K_S}{1 + s\tau_{IPC}} \Delta \delta \quad (7)$$

2.2 可控 IPC 阻尼系统振荡条件

为使 IPC 能够向系统提供阻尼转矩,采用控制手段对 IPC 参数进行控制,从而实现对系统阻尼转矩的增加。

对单机无穷大系统,由于 IPC 在 $-25^\circ < \delta_{IPC} < 25^\circ$ 范围内潮流的鲁棒性能,联络线功率几乎由 IPC 参数确定,因此可以近似认为

$$P_e = \sqrt{3} b_{IPC}, \quad K_P = \frac{\partial P_e}{\partial b_{IPC}} = \sqrt{3} \quad (8)$$

由此可见, $K_P > 0$ 恒成立。IPC 阻尼控制向系统的直接转矩为

$$\Delta T_{eIPC} = \frac{K_P K_D \omega_0 \Delta \omega}{1 + s \tau_{IPC}} = \left(\frac{K_P K_D \omega_s^2 \tau_{IPC}}{1 + \omega_s^2 \tau_{IPC}^2} + j \frac{K_P K_D \omega_s}{1 + \omega_s^2 \tau_{IPC}^2} \right) \Delta \delta \quad (9)$$

直接同步转矩 T_{SIPC} 为

$$T_{SIPC} = \frac{K_P K_D \omega_s^2 \tau_{IPC}}{1 + \omega_s^2 \tau_{IPC}^2} \quad (10)$$

直接阻尼转矩 T_{DIPC} 为

$$T_{DIPC} = \frac{K_P K_D \omega_s}{1 + \omega_s^2 \tau_{IPC}^2} \quad (11)$$

由于 $K_P > 0$, 所以 IPC 向系统提供阻尼转矩的条件为阻尼控制比例系数 $K_D > 0$ 。另外,由于间接转矩发生作用要经过一阶滞后环节,对系统的阻尼转矩影响很小,本文忽略间接转矩的影响。为了增强 IPC 阻尼控制的鲁棒性, K_D 的大小应该随着运行点位置的变化而变化以保证 IPC 向系统提供合适的阻尼转矩。

2.3 可控 IPC 增加系统同步转矩的条件

由式(10)可知,当以 $\omega_0 \Delta \omega$ 作为控制信号时, IPC 向系统提供阻尼转矩的同时还要向系统提供正的同步转矩,由于 IPC 的惯性时间常数 τ_{IPC} 较小,所以同步转矩很小,往往不能补偿 IPC 本身提供的负的同步转矩。为了使系统有足够的同步转矩,保证系统稳定性,需要对 IPC 进行参数控制以向系统提供同步转矩。这里取发电机的转子角 $\Delta \delta$ 作为控制的输入信号。根据电磁转矩的定义,可得:

$$\Delta T_{eIPC} = \frac{K_P K_S \Delta \delta}{1 + s \tau_{IPC}} = \left(\frac{K_P K_S}{1 + \omega_s^2 \tau_{IPC}^2} - j \frac{K_P K_S \omega_s \tau_{IPC}}{1 + \omega_s^2 \tau_{IPC}^2} \right) \Delta \delta \quad (12)$$

由上式可知,IPC 同步转矩控制向系统提供正同步转矩的条件是 $K_S > 0$,在 IPC 同步控制中,系统也会得到一个负阻尼转矩,但这个转矩一般较小。

总之 IPC 进行增加阻尼转矩和增加同步转矩的控制过程是相互影响的,但影响并不大,特别在 IPC 的惯性时间常数很小时,影响可以忽略。因此,可以将同步转矩控制和阻尼转矩控制分开进行。

3 系统仿真

单机无穷大系统是最简单的电力系统,本文对

图 4 所示的单机无穷大系统进行仿真,图中 G 为发电机; U_s 为无穷大系统母线电压; U_i 为发电机端电压。发电机参数(除时间常数外均为标么值): $X_d = 1.2$, $X'_d = 0.2$, $X_q = 1.2$, $X'_q = 0.1$, $\tau_J = 12$ s, $\tau_{d0}' = 10$ s, $K_A = 10$, $\tau_A = 0.01$ s;线路参数: $X_T = 0.1$, $X_{L1} = 0.4$ (单回线), $X_{L2} = 0.6$ (单回线)。仿真中,发电机用简单三阶模型,励磁调节系统用不计饱和的一阶惯性放大环节表示。

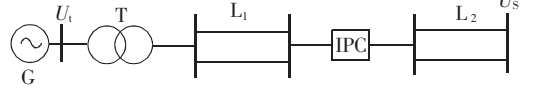


图 4 含 IPC 单机无穷大电力系统简图

Fig.4 Circuit of single-machine infinite-bus power system with IPC

对 IPC 工作于 $-25^\circ < \delta < 25^\circ$ 进行重点仿真,仿真分别在联络线重载和轻载情况下进行,联络线各节点开始负载均为 0。轻载初值如下:联络线传输功率为 0.4,相应的 $X_{IPC} = 2.46347$, $\delta_{IPC} = 0^\circ$ 。重载初值为:联络线传输功率为 1, $X_{IPC} = 1$, $\delta_{IPC} = -5^\circ$ 。仿真假设扰动在第 1 s 发生,仿真结果分别给出了发电机功率角、送端节点电压、受端节点电压以及 X_{IPC} 变化曲线(见图 5(c))。图中虚线表示仅进行同步控制,实线表示在同步控制的基础上追加了阻尼控制。仿真分 2 种情况进行。

a. 轻载时,受端节点负荷发生 0.25 的扰动,0.1 s 后消失,如图 5 所示。

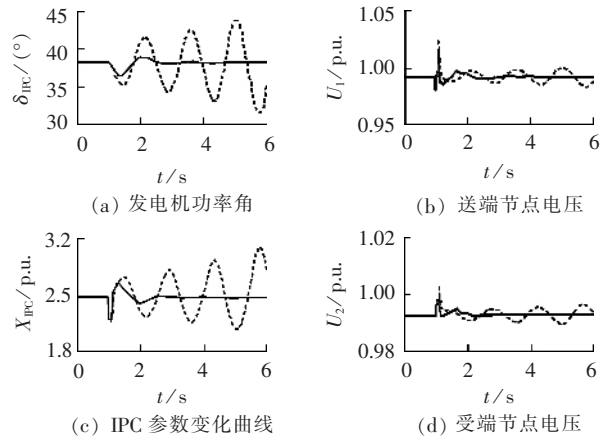


图 5 轻载断线故障仿真结果图

Fig.5 Simulative results of open circuit with light load

b. 重载时,受端节点负荷发生 0.2 的扰动,0.1 s 后消失,如图 6 所示。

仿真结果表明在单机无穷大系统中,对 IPC 进行同步参数控制后,IPC 不会发生“爬坡”失稳,但是会发生振荡,并且可能振荡失稳,而且仅进行同步参数控制时,IPC 调节量较大,调节动作频繁,IPC 两端节点电压也有较大波动,说明同步控制不能向系统提供足够的阻尼转矩所致;当在同步参数控制的基础上添加阻尼参数控制后,系统振荡可得到有效抑制,并且该控制可以适应多种工况,说明 IPC 阻尼控

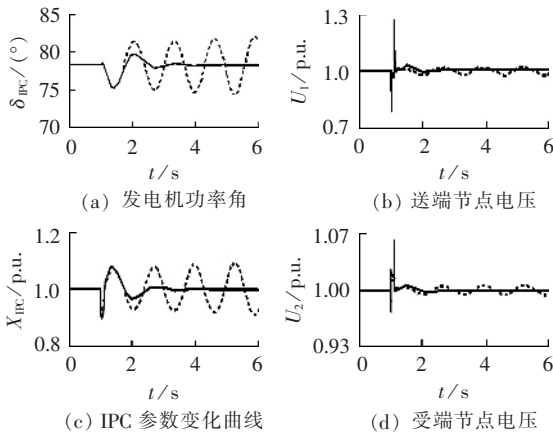


图6 重载断线故障仿真结果图

Fig.6 Simulative results of open circuit with heavy load

制可向系统提供足够的阻尼转矩,从而抑制系统振荡,保证系统稳定。

4 结语

相间功率控制器与传统的 FACTS 装置有本质的不同,它的引入会对系统的稳态运行情况产生很大的影响,并且对系统的暂态和动态稳定造成较大影响。含 IPC 系统中,IPC 不能向系统提供阻尼转矩,但会向系统提供负的同步转矩,从而导致低频振荡频率的变低,这无利于系统的动态稳定。为了使 IPC 向系统提供足够的阻尼转矩,必须对其参数进行控制以向系统提供阻尼。本文分析了 IPC 向系统提供阻尼转矩的条件、IPC 参数的控制方法,最后,以单机无穷大系统为例对上述论断进行了仿真验证,仿真表明,只要控制策略合理,控制器参数配置适当,IPC 就可以抑制系统的低频振荡。

参考文献:

- [1] 徐博文. 大电网互联的几个重要问题[J]. 电网技术, 1999, 23(9):32-34.
XU Bo-wen. Proposals concerning interconnection of regional power systems[J]. **Power System Technology**, 1999, 23(9):32-34.

- [2] 樊福而. 大电网互联系统的频率与潮流问题[J]. 电网技术, 2000, 24(6):27-29.
FAN Fu-er. Frequency and power flow of interconnected large power system[J]. **Power System Technology**, 2000, 24(6):27-29.
- [3] POURBEIK P, GIBBARD M J. Damping and synchronizing torques induced on generators by FACTS stabilizers in multimachine power systems[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1996, 11(4):1920-1925.
- [4] WANG H F. A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations. Part III: unified power flow controller[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 2000, 15(3):978-983.
- [5] 律方成, 王亚玲, 杨以涵, 等. TCSC 阻尼系统低频振荡的控制策略分析[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(7):23-26.
LÜ Fang - cheng, WANG Ya - ling, YANG Yi - han, et al. The control method analysis of TCSC in damping low-frequency oscillation[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1998, 22(7):23-26.
- [6] 杨晓东, 房大中, 刘长胜, 等. 阻尼联络线低频振荡的 SVC 自适应模糊控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1):55-63.
YANG Xiao-dong, FANG Da-zhong, LIU Chang-sheng, et al. An adaptive SVC fuzzy controller for damping tie-link low frequency oscillation[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2003, 23(1):55-63.
- [7] 柳焯. 相间功率控制器运行状态分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 1999, 39(3):69-71.
LIU Zhuo. Operation state analysis of interphase power controller[J]. **Journal of Tsinghua University:Sci. & Tech.**, 1999, 39(3):69-71.
- [8] LIU Xiu-kuan, WANG Qi, ZHOU Su-quan, et al. A study of interline power flow analysis based on a new mathematical model of interconnected power system with IPC [C]// **Proceedings of the Fifth IASTED International Conference Power and Energy Systems**. Spain: [s.n.], 2005:7-11.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

刘修宽(1973-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:windlxk@sina.com)。

Restraining low frequency oscillation of power system with IPC

LIU Xiu-kuan, JIANG Wei-yong, ZHOU Su-quan, WANG Qi, LIU Zhuo
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The circuit of IPC (Interphase Power Controller) is discussed and a linear model of the power system with an IPC in one transmission line is given. Based on the model, the form and properties of torque provided by IPC are analyzed. Analysis shows that IPC provides no positive damping torque but negative synchronus torque, which is disadvantageous to power system stability. By adjusting IPC parameters with appropriate control strategy, positive synchronous torque and damping torque can be provided to keep power system synchronization and damp power system oscillation.

This project is supported by National Natural Science Fund(50177006, 59477010).

Key words: FACTS; interphase power controller; low frequency oscillation