

文章编号:1006-2467(2021)12-1608-11

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.321

“双碳”背景下线间潮流控制器多目标协调控制策略

蔡 晖¹, 高伯阳², 祁万春¹, 吴 熙², 谢珍建¹, 黄俊辉¹

(1. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 南京 210008;

2. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096)

摘 要:“碳达峰、碳中和”目标对考虑安全性和稳定性的电力系统低碳运行提出了更高要求, 新能源的大规模接入容易引发电网潮流分布不均与机电振荡等问题. 作为第3代柔性交流输电系统(FACTS)的代表性设备, 线间潮流控制器(IPFC)具有强大的潮流调控、振荡阻尼和暂态稳定控制能力, 但在不同工况下关注的主要目标不同, 且目标间存在着矛盾关系. 首先, 基于改进相对增益矩阵(MRGA)理论, 线性化含IPFC的系统状态方程, 量化分析目标间的相互作用, 选择附加控制器的叠加位置, 削弱稳态调控与动态控制间的交互影响. 其次, 针对暂态过程, 结合模糊逻辑理论设计了IPFC多目标协调控制器. 最后, 通过粒子群算法优化了控制器参数, 在提高暂态稳定和小干扰稳定的同时, 减少暂态过程中的潮流超调, 增强了IPFC在不同系统运行工况下的协调控制能力, 有利于解决“双碳”背景下电力系统负荷大、惯性低、波动随机所带来的能源传输消纳与安全稳定控制等难题.

关键词: 线间潮流控制器; 交互影响; 协调控制; 模糊逻辑; 粒子群优化算法

中图分类号: TM 732

文献标志码: A

A Coordination Control Strategy of Interline Power Flow Controller in Carbon Peaking and Carbon Neutrality

CAI Hui¹, GAO Boyang², QI Wanchun¹, WU Xi², XIE Zhenjian¹, HUANG Junhui¹

(1. Economic Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The goal of “carbon peaking and carbon neutrality” puts forward higher requirements for low-carbon operation of power system considering security and stability. The large-scale access of new energy easily leads to problems such as uneven distribution of power flow and electromechanical oscillation. As the representative device of the third-generation flexible AC transmission system (FACTS), interline power flow controller (IPFC) is greatly capable of power flow control, damping control and transient stability control, but the main objectives of IPFC vary considerably under different working conditions, and there is contradiction between the goals. First, based on the improved relative gain matrix (MRGA) theory, the system state equation with IPFC was linearized, the interaction between targets was quantitatively analyzed, the superposition position of the additional controller was selected, and the interaction between steady-state control and dynamic control was weakened. Then, for the transient

收稿日期: 2021-07-28

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021015)

作者简介: 蔡 晖(1984-), 男, 江苏省盐城市人, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划技术.

电话(Tel.): 15722923765; E-mail: caihui300@hotmail.com.

process, combined with fuzzy logic theory, the IPFC multi-objective coordinated controller was designed. Finally, the controller parameters were optimized using the particle swarm algorithm. While improving the transient stability and small disturbance stability, the controller reduced the power flow overshoot during the transient process and enhanced the coordinated control ability of IPFC under different system operating conditions. It was helpful to solve the problems of energy transmission and consumption, safety and stability control caused by the large load, low inertia, and random fluctuations of the power system under the “dual carbon” background.

Key words: interline power flow controller; interaction analysis; coordination control; fuzzy control; particle swarm optimization algorithm

符号说明

A, B, C, D —系统状态矩阵

C_{dc} —直流电容

D —同步电机定常阻尼系数

E_{fd} —同步电机励磁电动势

E_q —同步电机空载电动势

E'_q —同步电机电动势

$G_1(s), G_2(s)$ —电力系统传递函数

H —机组惯性时间常数

I_d, I_q —线路 d 轴电流、 q 轴电流

I_{ij}, I_{ik} —线路 ij, ik 间的电流

I_{ijd}, I_{ijq} —线路 ij 间电流的 d 轴分量、 q 轴分量

I_{ikd}, I_{ikq} —线路 ik 间电流的 d 轴分量、 q 轴分量

I_{ild}, I_{ilq} —线路 il 间电流的 d 轴分量、 q 轴分量

k —常规控制增益

K —放大环节增益

K_a —同步电机自动电压调节器增益

$K_1, K_2, K_{pd}, K_{pm1}, K_{p01}, K_{pm2}, K_{p02}, K_3, K_4, K_{qd}, K_{qm1}, K_{q01},$

$K_{qm2}, K_{q02}, K_5, K_6, K_{pd2}, K_{vd}, K_{pm3}, K_{p03}, K_{pm4}, K_{p04}, K_7, K_8,$

$K_9, K_{cm1}, K_{c01}, K_{cm2}, K_{c02}, K_{jp1}, K_{jp2}, K_{jp3}, K_{jpm1}, K_{jp01}, K_{jpm2},$

$K_{jp02}, K_{jq1}, K_{jq2}, K_{jq3}, K_{jqm1}, K_{jq01}, K_{jqm2}, K_{jq02}, K_{kp1}, K_{kp2},$

$K_{kp3}, K_{kpm1}, K_{kp01}, K_{kpm2}, K_{kp02}$ —与系统参数和初始运行条件

有关的常数

m_1, m_2 —主控侧、辅控侧换流器调制比

M —惯性常数

P_e —同步电机输出瞬时功率

P_{ij} —主控侧实时有功功率

$P_{ij\text{ref}}$ —主控侧有功功率参考值

P_{ik} —辅控侧实时有功功率

$P_{ik\text{ref}}$ —辅控侧有功功率参考值

P_m —同步电机机械功率

P_n —发电机输出有功功率

Q_{ij} —主控侧实时无功功率

Q_{ik} —线路 ik 输送的无功功率

$Q_{ij\text{ref}}$ —主控侧无功功率参考值

T_1, T_2, T_3, T_4 —超前滞后补偿环节时间常数

T_a —同步电机自动电压调节器时间常数

T_w —隔直环节时间常数

u —常规控制输出信号

u_1, u_2 —闭环控制输入信号

V_{dc} —直流电容实时电压

$V_{d\text{cref}}$ —直流电容电压参考值

V_T —同步电机端电压

V_{T0} —同步电机端电压参考值

V_i, V_j, V_k, V_l —节点 i, j, k, l 电压

V_{Td}, V_{Tq} —同步电机端电压 d 轴分量、 q 轴分量

V_{jd}, V_{jq} —节点 j 电压 d 轴分量、 q 轴分量

V_{kd}, V_{kq} —节点 k 电压 d 轴分量、 q 轴分量

V_{seij}, V_{seik} —线路 ij, ik 上的换流器电压

V_{seijq}, V_{seijd} —主控侧等效电压源 q 轴分量、 d 轴分量

V_{seikq}, V_{seikd} —辅控侧等效电压源 q 轴分量、 d 轴分量

$X_{11d}, X_{21d}, X_{jd}, X_{e1d}, X_{12d}, X_{22d}, X_{kd}, X_{e2d}, X_{13d}, X_{23d}, X_{ld},$

$X_{e3d}, X_{11q}, X_{21q}, X_{jq}, X_{12q}, X_{22q}, X_{kq}, X_{13q}, X_{23q}, X_{lq}$ —与线路

和发电机参数有关的阻抗值

X_d, X_q —定子 d 轴电抗、 q 轴电抗

X'_d —一次暂态电抗

y_1, y_2 —电力系统输出信号

θ_1, θ_2 —主控侧、辅控侧换流器电压相角

δ —同步电机转子角

ω —转子角速度

ω_0 —基准角频率

在“碳达峰、碳中和”目标提出的背景下,新能源的战略地位进一步明确,清洁能源将迎来更加持续、高速的发展,我国电力系统深度脱碳已成为必经之路.这种能源转型为电网带来了强不确定性和低惯

性等特征,对清洁能源的传输消纳与系统的安全稳定运行提出了新的挑战.

一方面,在“双碳”背景下,高比例清洁能源发电与并网技术不断发展,大规模水、风、光等清洁能源

持续接入电网,各地新能源的开发力度逐渐加大,局部地区负荷密度迅速增长,恶化了潮流分布不均的情况,这不仅制约了交流输电系统的潮流输送能力,还增加了电网低碳运行的控制难度,使电力系统的柔性调节需求不断增强。

另一方面,考虑到新能源接入后的可控性相对较差,高比例新能源电力系统除了会引发能源传输消纳上的难题,还会在电网安全运行上带来挑战。作为世界上清洁能源并网规模最大的国家,我国有着复杂的地型和多样类型的气候,新能源日内最大功率波动较大。据相关资料^[1]介绍,风电日波动最大幅度可达装机容量的 80%,而光伏发电受昼夜变化、天气变化、移动云层的影响,同样存在间歇性和波动性。同时,高占比可再生能源电网存在惯性降低的问题,频率将更加不稳定,功角稳定特性将更加复杂,随机性波动现象将更加严重,给电力系统的低碳高效运行带来了安全隐患。

为了增强“碳达峰、碳中和”背景下电网的柔性调节能力、抗扰动能力和支撑新能源发展能力,需要有效手段来解决上述问题。综合型柔性交流输电系统(FACTS)设备在提高电网安全运行水平、优化已有资源配置等方面取得了较好的应用成果^[2-4],有利于建设适应高比例新能源广泛接入的新型电力系统。近年来,统一潮流控制器(UPFC)在我国得以应用^[5],大幅提升了所在电网的输电能力,但由于自身的拓扑限制,UPFC 一般只能控制单输电通道潮流,无法同时对多输电通道潮流进行均衡,且 UPFC 所控过载部分潮流将通过自然分布的形式散布至其他输电通道,有可能使得其他邻近重载线路潮流越限。

线间潮流控制器同为第三代 FACTS 设备的典型代表^[6-9],能够大幅度提升电网输电能力与柔性控制水平,增加电网输电线路利用率和系统运行效率,从而节约廊道资源与新建通道投资^[10]。相较于 UPFC^[11],线间潮流控制器(IPFC)不仅能灵活、准确地调控不同输电通道的潮流,而且可以避免其他临近重载的线路出现潮流越限的情况^[12-13]。此外,这种新型装置能根据电力系统的运行状态,实时进行暂态稳定控制及阻尼振荡控制。因此,IPFC 在负荷密集型的电力系统中有广阔的应用前景^[14-15]。

然而,IPFC 控制各目标的原理并不相同,被控量间也存在着交互影响与矛盾关系,控制目标会因为彼此间的针对性调节而产生波动。进一步地,IPFC 在不同系统工况下也有着不同的主要关注对象,例如在稳态时着重优化线路潮流分布,受到暂态扰动的过程中则着重于抑制系统振荡^[16]。综上所述,

作为一种建设成本较高的装置,IPFC 应当考虑不同运行场景,兼顾各种系统约束条件,协调目标间的控制。为此,应当分析目标间的相互影响关系,加强 IPFC 潮流追踪,提高暂态稳定和小干扰稳定等多个要求,从而为 IPFC 适应不同运行工况、走向工程实用化提供一定的技术支撑。

鉴于此,提出了一种线间潮流控制器交互影响分析方法及多目标协调控制策略。基于改进相对增益矩阵(MRGA)理论对含 IPFC 的系统状态方程进行了线性化,量化了目标间的交互影响,定量分析了 IPFC 控制目标间的相互作用和排斥关系,选择了附加控制器的叠加位置,削弱了稳态调控与动态控制间的交互影响。进一步地,针对暂态过程,设计了多目标模糊逻辑控制器及基于模糊自适应控制的协调策略。结合粒子群算法优化了 IPFC 模糊控制器参数,在提高了暂态稳定和小干扰稳定的同时,减少了暂态过程中的潮流超调,挖掘了 IPFC 在不同系统运行工况下的协调控制潜力,有利于电力系统低碳运行的安全性与稳定性。

1 IPFC 工作原理

IPFC 是一种针对多条线路潮流控制功能更为强大的综合型 FACTS 装置,由多个共用直流母线的电压源换流器组成,通过串联耦合变压器接入不同的输电线路,灵活、准确地调控各通道潮流。

图 1 所示为 IPFC 的通用结构示意,其中 VSC 为换流器, n 为换流器串联线路编号。各换流器通过换流变压器接入系统,在运行调控时对所处线路注入幅值和相角均可控的等效注入电压。

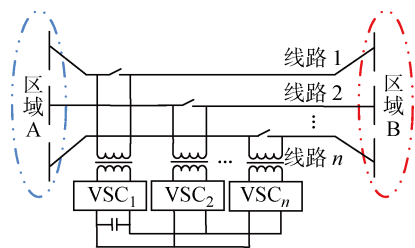


图 1 IPFC 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IPFC

可以选择一条或数条传输线路作为主控线路,并选择剩余的线路作为辅控线路,在确保主控线路潮流不越限的情况下,将过载潮流合理分配至其他线路。类似于其他的 FACTS 设备,IPFC 本身相对于整个系统而言,在运行的过程中并不会对外部输送有功功率,也不会从外部吸收有功功率,这意味着各换流器间的有功交换始保持着动态平衡的状态。

IPFC 动态模型控制框图如图 2 所示. 主要包括主控侧有功、主控侧无功、辅控侧有功和直流侧电压 4 个比例积分(PID)控制器和 V_{dc} 计算模块. 4 个 PI 控制器的输入分别为主控侧有功功率参考值 P_{ijref} 与主控侧实时有功功率 P_{ij} ; 主控侧无功功率参考值 Q_{ijref} 与主控侧实时无功功率 Q_{ij} ; 辅控侧有功功率参考值 P_{ikref} 与辅控侧实时有功功率 P_{ik} ; 直流电容电压参考值 V_{dcref} 与直流电容实时电压 V_{dc} . PI 控制器的输出分别为主控侧等效电压源 q 轴分量 V_{seijq} 、 d 轴分量 V_{seijd} ; 辅控侧等效电压源 q 轴分量 V_{seikq} 、 d 轴分量 V_{seikd} .

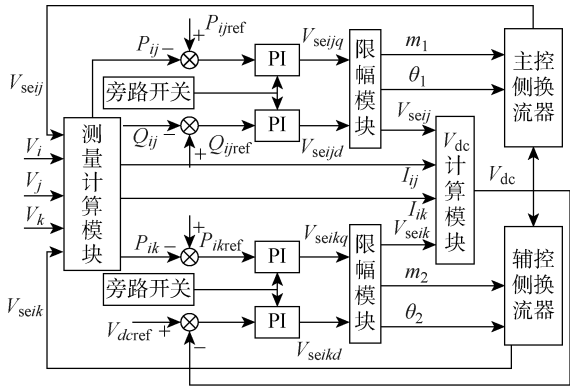


图 2 IPFC 动态模型控制框图

Fig. 2 Control diagram of IPFC dynamic model

换流器在运行调控的过程中,需保持主、辅控线路间的有功交换平衡约束. IPFC 通过改变 θ_2 平衡换流器间的有功动态交换,实现直流侧的稳压. 动态模型中的直流电容充放电过程用下式反映:

$$\begin{aligned} \frac{dV_{dc}}{dt} = & \frac{m_1}{2C_{dc}} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ijd} \\ I_{ijq} \end{bmatrix} + \\ & \frac{m_2}{2C_{dc}} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ikd} \\ I_{ikq} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: t 为时间.

2 IPFC 控制目标交互影响分析

2.1 改进相对增益矩阵(RGA)算法

为了削弱 IPFC 稳态调控与动态控制间的交互影响,通过 MRGA 理论量化分析 IPFC 各控制器的控制目标交互影响,选择附加控制器的叠加位置,如图 3 所示.

作为一种定量分析交互影响的有效方法,相对增益矩阵(RGA)理论常被用来寻找目标间的最小静态交互影响,并选择最佳控制变量配对. 考虑到 IPFC 附加控制被叠加在常规控制上,此时若仍采用传统 RGA 计算,则会因式中系统传递函数 $G(s)$ 矩

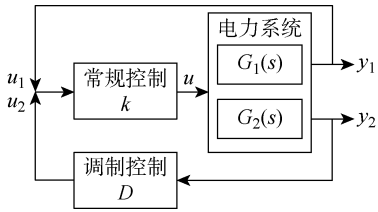


图 3 控制目标的叠加示意图

Fig. 3 Schematic diagram for superposition of control targets

阵稳态时的值 $G(0)$ 为奇异矩阵而无法得到结果^[17-18]. 鉴于此,基于 RGA 的基本原理引出 MRGA 理论.

根据 RGA 基本思想可知,输入 u_1 对输出 y_2 的交互影响为

$$\lambda_{12} = \frac{y_2(C1)}{y_2(C2)} \quad (2)$$

式中: C1 表示所有控制开环回路; C2 表示 $y_1 - u_1$ 闭环回路.

同样,输入 u_2 对输出 y_1 的交互影响为

$$\lambda_{21} = \frac{y_1(C1)}{y_1(C3)} \quad (3)$$

式中: C3 表示 $y_2 - u_2$ 闭环回路.

根据相关推导有:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{12} &= 1 - kG_1(s) \\ \lambda_{21} &= 1 - kDG_2(s) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

λ_{12} 与 λ_{21} 即为求得的相对增益,可量化目标间的交互影响. 若二者在数值上越接近 1,则说明此时评估的通道间交互影响较小. 反之,若二者取值较大,则表明此时评估的通道间交互影响很大^[17].

定义好评估体系后,按以下步骤量化控制目标间的交互影响:

(1) 结合需要研究的电力系统,建立含 IPFC 控制器的状态方程,对模型线性化并转化为传递函数形式 $G(s)$.

采用 Phillips-Heffron 线性化模型^[18],将装有 IPFC 的系统表示为下式所示的状态空间方程形式:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{X} &= A\Delta X + B\Delta U \\ \Delta Y &= C\Delta X + D\Delta U \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

转化为频域传递函数的形式有:

$$\left. \begin{aligned} Y(s) &= G(s)U(s) \\ G(s) &= C(sI - A)^{-1}B + D \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\Delta X = [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E'_q \ \Delta E'_{fd} \ \Delta V_{dc}]^T$, 为含 IPFC 系统的状态变量; $\Delta U = [\Delta m_1 \ \Delta\theta_1 \ \Delta m_2 \ \Delta\theta_2]^T$, 为 IPFC 控制器输入变量; $\Delta Y = [\Delta P_{ij} \ \Delta Q_{ij} \ \Delta P_{ik} \ \Delta V_{dc} \ \Delta\omega]^T$, 为 IPFC 控制器输出变量; $Y(s)$ 、 $U(s)$ 分别为 ΔY 、 ΔU 的频域函数; I 为 5×5 的单位矩阵.

(2) 依次量化分析附加控制信号的各种选择方案. 取 $s=0$, 得到系统稳态增益矩阵, 并结合式(4) 得出每种方案下 λ_{12} 与 λ_{21} 的计算结果.

(3) 结合 MRGA 的物理意义, 分析不同控制方式下控制目标间的交互影响大小, 选择相对增益最接近 1 的最佳控制配对.

2.2 装有 IPFC 电力系统的 Phillips-Heffron 模型

搭建的 IPFC 动态模型场景如图 4 所示, 其中潮流裕度较大的线路 ik 为辅控线路, 线路 ij 为主控线路, m' 、 n' 分别为线路 ij 、 ik 上的附加虚拟节点. 发电机及网架的具体参数如表 1、2 所示. 表中: G_1 、 G_2 为发电机; X_d 、 X'_d 、 X''_d 分别为定子 d 轴电抗、暂态电抗、次暂态电抗; X_q 、 X'_q 分别为定子 q 轴电抗、次暂态电抗; T'_{d0} 、 T''_{d0} 为 d 轴开路暂态、次暂态时间常数; T''_{q0} 为 q 轴开路次暂态时间常数; r_1 、 l_1 、 c_1 分别表示线路单位长度电阻、电感、电容值. 其中, 所

有单位采用标么值. IPFC 主控线路及辅控线路串联变压器电抗值为 $X_{seij} = X_{seik} = 0.000\ 92\ \text{p. u.}$, 其输出最大电压限制为 $V_{seij\max} = V_{seik\max} = 0.115\ \text{p. u.}$. 主控线路有功控制器比例参数 $K_{1\text{pP}} = 0.005$, 积分参数 $K_{1\text{iP}} = 1.5$, 主控线路无功控制器以及辅控线路有功控制器 PI 参数与主控线路有功控制器一致. 辅控线路直流电压控制器比例参数 $K_{\text{pDC}} = 0.001$, 积分参数 $K_{\text{iDC}} = 0.002$.

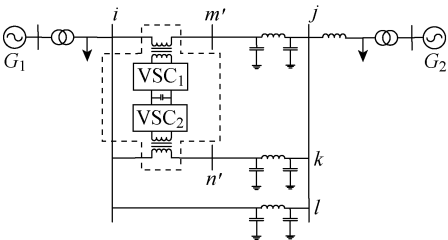


图 4 IPFC 安装场景
Fig. 4 Installation scene of IPFC

表 1 发电机主要参数
Tab. 1 Main parameters of generator

发电机	P_n	X_d	X'_d	X''_d	X_q	X'_q	T'_{d0}	T''_{d0}	T''_{q0}	H
G_1	1.0	1.305	0.296	0.252	0.474	0.243	1.01 s	0.053 s	0.1 s	3.7
G_2	1.2	1.305	0.296	0.252	0.474	0.243	1.01 s	0.053 s	0.1 s	3.7

表 2 线路主要参数
Tab. 2 Main parameters of line

线路	r_1	$l_1 \times 10^3$	$c_1 \times 10^9$	长度/km
ij	0.025 46	0.933 7	12.74	0.4
ik	0.025 46	0.933 7	12.74	0.6
il	0.025 46	0.933 7	12.74	0.5

首先线性化含 IPFC 控制器的状态方程模型, 从而得到电力系统的传递函数模型 $G(s)$. 系统采用一阶励磁系统模型, 其动态模型为^[18]

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega_0 \omega \\ \dot{\omega} &= (P_m - P_e - D\omega)/2H \\ \dot{E}'_q &= (-E_q + E_{fd})/T'_{d0} \\ \dot{E}_{fd} &= -\frac{1}{T_a} E_{fd} + \frac{K_a}{T_a} (V_{T0} - V_T) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$
$$\left. \begin{aligned} P_e &= V_T I_d + V_{Tq} I_q \\ E_q &= E'_q + (X_d - X'_d) I_d \\ V_T &= \sqrt{(X_q I_q)^2 + (E'_q - X'_d I_d)^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: \dot{E}_{fd} 为同步发电机励磁电势 q 轴分量. 根据相关文献和推导可得所需研究的系统中机端电流方程为^[19]

$$\left. \begin{aligned} I_d &= I_{ijd} + I_{ikd} + I_{ild} \\ I_q &= I_{ijq} + I_{ikq} + I_{ilq} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} I_{ijd} &= V_{seijq} X_{11d} + V_{seikq} X_{21d} + \\ &\quad V_j X_{jd} \cos \delta + E'_q X_{e1d} \\ I_{ikd} &= V_{seijq} X_{12d} + V_{seikq} X_{22d} + \\ &\quad V_k X_{kd} \cos \delta + E'_q X_{e2d} \\ I_{ild} &= V_{seijq} X_{13d} + V_{seikq} X_{23d} + \\ &\quad V_l X_{ld} \cos \delta + E'_q X_{e3d} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{ijq} &= V_{seijd} X_{11q} + V_{seikd} X_{21q} + V_j X_{jq} \sin \delta \\ I_{ikq} &= V_{seijd} X_{12q} + V_{seikd} X_{22q} + V_k X_{kq} \sin \delta \\ I_{ilq} &= V_{seijd} X_{13q} + V_{seikd} X_{23q} + V_l X_{lq} \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(9)~式(11)代入式(8)并线性化, 可得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_e &= K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{pd} \Delta V_{dc} + \\ &\quad K_{pm1} \Delta m_1 + K_{p\theta1} \Delta \theta_1 + \\ &\quad K_{pm2} \Delta m_2 + K_{p\theta2} \Delta \theta_2 \\ \Delta E'_q &= K_4 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_q + K_{qd} \Delta V_{dc} + \\ &\quad K_{qm1} \Delta m_1 + K_{q\theta1} \Delta \theta_1 + \\ &\quad K_{qm2} \Delta m_2 + K_{q\theta2} \Delta \theta_2 \\ \Delta V_T &= K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{vd} \Delta V_{dc} + \\ &\quad K_{pm3} \Delta m_1 + K_{p\theta3} \Delta \theta_1 + \\ &\quad K_{pm4} \Delta m_2 + K_{p\theta4} \Delta \theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

进一步地, 将式(12)代入式(7)并线性化, 有:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega$$
$$\Delta \dot{\omega} = -(K_1 \Delta \delta + D \Delta \omega + K_2 \Delta E'_q + K_{pd1} \Delta V_{dc})/M - (K_{pm1} \Delta m_1 + K_{p\theta1} \Delta \theta_1 + K_{pm2} \Delta m_2 + K_{p\theta2} \Delta \theta_2)/M$$
$$\Delta \dot{E}'_q = -(K_4 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_q - \Delta E_{fd} + K_{qd} \Delta V_{dc})/T'_{d0} - (K_{qm1} \Delta m_1 + K_{q\theta1} \Delta \theta_1 + K_{qm2} \Delta m_2 + K_{q\theta2} \Delta \theta_2)/T'_{d0}$$
$$\Delta \dot{E}_{fd} = -K_a (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + \Delta E_{fd} - K_{pd2} \Delta V_{dc})/T_a - K_a (K_{pm3} \Delta m_1 + K_{p\theta3} \Delta \theta_1 + K_{pm4} \Delta m_2 + K_{p\theta4} \Delta \theta_2)/T_a$$

(13)

将式(9)~式(11)代入式(1)并线性化可知:

$$\Delta \dot{V}_{dc} = K_7 \Delta \delta + K_8 \Delta E'_q - K_9 \Delta V_{dc} + K_{cm1} \Delta m_1 + K_{c\theta1} \Delta \theta_1 + K_{cm2} \Delta m_2 + K_{c\theta2} \Delta \theta_2$$

(14)

由图 4 可知:

$$P_{ij} + jQ_{ij} = \dot{V}_j \dot{I}_{ij}^* = (V_{jd} + jV_{jq})(I_{ijd} - I_{ijq})$$
$$P_{ik} + jQ_{ik} = \dot{V}_k \dot{I}_{ik}^* = (V_{kd} + jV_{kq})(I_{ikd} - I_{ikq})$$

(15)

式中: j 为虚数; \dot{I}_{ij}^* 为线路*ij*电流的共轭复数; \dot{I}_{ik}^* 为线路*ik*电流的共轭复数.

即可得到:

$$\left. \begin{aligned} P_{ij} &= V_{jd} I_{ijd} + V_{jq} I_{ijq} \\ Q_{ij} &= V_{jq} I_{ijd} - V_{jd} I_{ijq} \end{aligned} \right\}$$

(16)

将式(16)代入式(14)~式(15)并线性化:

$$\Delta P_{ij} = K_{jp1} \Delta \delta + K_{jp2} \Delta E'_q + K_{jp3} \Delta V_{dc} + K_{jpm1} \Delta m_1 + K_{j\theta1} \Delta \theta_1 + K_{jpm2} \Delta m_2 + K_{j\theta2} \Delta \theta_2$$
$$\Delta Q_{ij} = K_{jq1} \Delta \delta + K_{jq2} \Delta E'_q + K_{jq3} \Delta V_{dc} + K_{jqm1} \Delta m_1 + K_{j\theta1} \Delta \theta_1 + K_{jqm2} \Delta m_2 + K_{j\theta2} \Delta \theta_2$$
$$\Delta P_{ik} = K_{kp1} \Delta \delta + K_{kp2} \Delta E'_q + K_{kp3} \Delta V_{dc} + K_{kpm1} \Delta m_1 + K_{k\theta1} \Delta \theta_1 + K_{kpm2} \Delta m_2 + K_{k\theta2} \Delta \theta_2$$

(17)

综合式(13)、式(14)和式(17),可得式(5)中各矩阵 **A**、**B**、**C**、**D** 分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & -\frac{K_{pd}}{M} \\ -\frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} & -\frac{K_{qd}}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_a K_5}{T_a} & 0 & -\frac{K_a K_6}{T_a} & -\frac{1}{T_a} & -\frac{K_a K_{vd}}{T_a} \\ K_7 & 0 & K_8 & 0 & -K_9 \end{bmatrix}$$

(18)

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{pm1}}{M} & -\frac{K_{p\theta1}}{M} & -\frac{K_{pm2}}{M} & -\frac{K_{p\theta2}}{M} \\ -\frac{K_{qm1}}{T'_{d0}} & -\frac{K_{q\theta1}}{T'_{d0}} & -\frac{K_{qm2}}{T'_{d0}} & -\frac{K_{q\theta2}}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_a K_{pm3}}{T_a} & -\frac{K_a K_{p\theta3}}{T_a} & -\frac{K_a K_{pm4}}{T_a} & -\frac{K_a K_{p\theta4}}{T_a} \\ K_{cm1} & K_{c\theta1} & K_{cm2} & K_{c\theta2} \end{bmatrix}$$

(19)

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} K_{jp1} & 0 & K_{jp2} & 0 & K_{jp3} \\ K_{jq1} & 0 & K_{jq2} & 0 & K_{jq3} \\ K_{kp1} & 0 & K_{kp2} & 0 & K_{kp3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(20)

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} K_{jpm1} & K_{j\theta1} & K_{jpm2} & K_{j\theta2} \\ K_{jqm1} & K_{jq\theta1} & K_{jqm2} & K_{jq\theta2} \\ K_{kpm1} & K_{k\theta1} & K_{kpm2} & K_{k\theta2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(21)

2.3 基于 MRGA 的控制目标交互影响分析

在量化交互影响的过程中,为了能更清楚地揭示交互影响的实质,取主控有功控制器 $m_1 = K_{p1}(P_{ij\text{ref}} - P_{ij})$,主控无功控制器 $\theta_1 = K_{q1}(Q_{ij\text{ref}} - Q_{ij})$,辅控有功控制器 $m_2 = K_{p2}(P_{ik\text{ref}} - P_{ik})$,直流电压控制器 $\theta_2 = K_{dc}(V_{d\text{cref}} - V_{dc})$,其中 K_{p1} 、 K_{q1} 、 K_{p2} 、 K_{dc} 分别为线路*ij*有功功率、线路*ij*无功功率、线路*ik*有功功率及直流电压 PI 控制器比例系数.分别线性化后代入式(4),得到调制控制附加于 IPFC 不同控制回路时的 MRGA,具体计算结果如表 3 所示.

表 3 IPFC 交互影响的 MRGA 计算结果

Tab.3 MRGA calculation results of interaction of IPFC

常规控制目标	常规控制对 附加控制影响	附加控制对 常规控制影响
主控侧有功	1.054 2	1.043 7
主控侧无功	0.977 3	1.226 2
辅控侧有功	1.054 4	1.043 1
直流侧电压	6.781 3	1.312 0

可知,当附加控制叠加于有功功率控制和无功功率控制时,该回路与各常规回路彼此间的影响相对较小;而叠加于直流电压的附加控制也没有对常规控制造成很大影响,但直流电压控制却与附加控制产生了比较明显的交互作用.为了提高 IPFC 协调控制的效果,不应将附加控制直接叠加于直流电压控制上.

以类电力系统静态稳定器(PSS)线性阻尼控制器作为附加控制器,验证直流侧电压控制与调制控制的交互影响.线性调制控制器设置参数设置为 $K=35, T_1=0.2, T_2=0.05, T_3=0.3, T_4=1$.控制框图如图 5 所示.其中,阻尼控制器的输出信号与 P_{ij} 和 P_{ijref} 叠加在一起作为有功 PI 控制器的输入.在 IPFC 附近发电机中随机加入大小不等的扰动源,如图 6 所示.

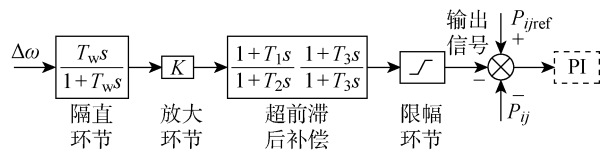


图 5 类 PSS 线性阻尼控制器

Fig. 5 Similar PSS linear damping controller

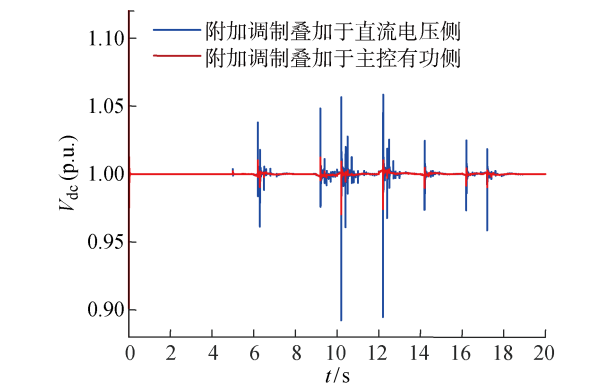


图 6 交互影响验证

Fig. 6 Verification of interaction effect

从二者的对比可以看出,当附加控制叠加于有功侧时,直流电容电压波动范围更小,持续时间更短,与上述通过 MRGA 计算得出的结论相符.因此,将附加控制器叠加于 P_{ij} 与 P_{ik} 上,避免附加控制器在动态控制时与其他控制器之间的交互作用影响到各回路间的协调运作,从而削弱稳态调控与动态控制间的交互影响.

3 基于模糊逻辑的 IPFC 暂态协调控制

在削弱了 IPFC 稳态调控与动态控制间的交互影响之后,设计 IPFC 多目标协调控制策略,在提高暂态稳定和小干扰稳定的同时,减少暂态过程中的潮流超调.考虑到线性附加控制器的参数是基于系统某一运行点的线性化设计的,对系统工况变化的适应性差^[20],可基于模糊逻辑设计 IPFC 协调控制.

首先设计模糊控制器的结构.由于发电机转速差反映了发电机的转速波动情况,即反映出系统的

振荡水平,其变化率反映出系统的振荡趋势;而线路有功功率与参考值的误差信号 ΔP_L 则可以反应有功功率的超调情况,将 $\Delta\omega$ 与 ΔP_L 设为模糊控制器的输入.进一步地,根据第 2 节中的交互影响分析,将模糊控制器的输出叠加于主控侧有功功率 P_{ij} 和辅控侧有功功率 P_{ik} 控制器上.具体结构如图 7 所示.图中, $L_1 \sim L_4$ 分别为偏差量 $x_1 \sim x_4$ 与控制器输入量 $x'_1 \sim x'_4$ 间的比例因子; L_5, L_6 分别为系统实际输出量 y_1, y_2 与控制器输出量 y'_1, y'_2 间的比例因子.图中给出了输出信号叠加与主控侧有功的情况.其中,模糊控制器的输出 y 与 P_{ij} 和 P_{ijref} 叠加在一起作为有功 PI 控制器的输入.叠加于辅控侧的情况于此类似.

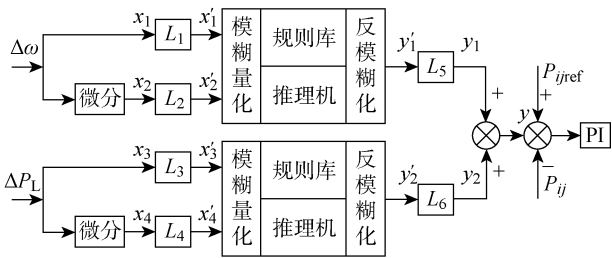


图 7 IPFC 模糊逻辑控制器结构图

Fig. 7 Structure diagram of IPFC fuzzy logic controller

接着确定控制规则表.将输入变量与输出变量均表述为“正大”(PB)、“正中”(PM)、“正小”(PS)、“零”(ZR)、“负小”(NS)、“负中”(NM)和“负大”(NB)组成的模糊集,设计出如表 4 所示的控制规则表.

表 4 模糊控制规则
Tab. 4 Rule of fuzzy control

偏差 微分	偏差						
	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZR
PM	PB	PB	PM	PM	PS	ZR	NS
PS	PB	PM	PM	PS	ZR	NS	NM
ZR	PM	PM	PS	ZR	NS	NM	NM
NS	PM	PS	ZR	NS	NM	NM	NB
NM	PS	ZR	NS	NM	NM	NB	NB
NB	ZR	NS	NM	NM	NB	NB	NB

以表中第 1 个单元为例,介绍相应的控制规则.首先以输入信号 ΔP_L 为例进行介绍:功率偏差 x'_3 为“正大”(PB)表明线路的功率振荡 ΔP_L 为正且幅值很大,偏差微分 x'_4 为“正大”(PB)表明 ΔP_L 正以最大速率增大.根据功角关系可知线路两侧发电机

转子角差的增量很大,并有快速增大的趋势.应当迅速增大送电端发电机电磁功率的输出,从而使转子减速,减小转子角差,平息振荡.由功角特性可知,对于 IPFC 而言应快速提高线路的输送功率以使总输送功率增大.故输出信号 y'_2 为 PB,即上述规则的结论.

接着以输入信号 $\Delta\omega$ 为例进行介绍: x'_1 为“正大”(PB)表明此时转速远大于 1, x'_2 为“正大”(PB)说明转速还在以很大的速率增大,故此时应该迅速降低转速.由转子运动方程知,增大输送功率可以降低转速.为了快速抑制这种振荡,此时输出的调制信号应为正大(PB),通过修正使输送功率参考值变小,系统阻尼水平增加,最终平息振荡.故输出信号 y'_1 为 PB,即上述规则的结论.

表 4 控制规则能够同时适应 IPFC 主控、辅控侧的调制要求.充分反映了人的知识及经验,并具有完备、简单、直观的优点.

最后,选取合适的输入、输出模糊集隶属函数,如图 8 所示.其中,横坐标分别为模糊控制器输入信号 $x'_1 \sim x'_4$,输出信号 y'_1, y'_2 ,纵坐标 M' 为隶属度.

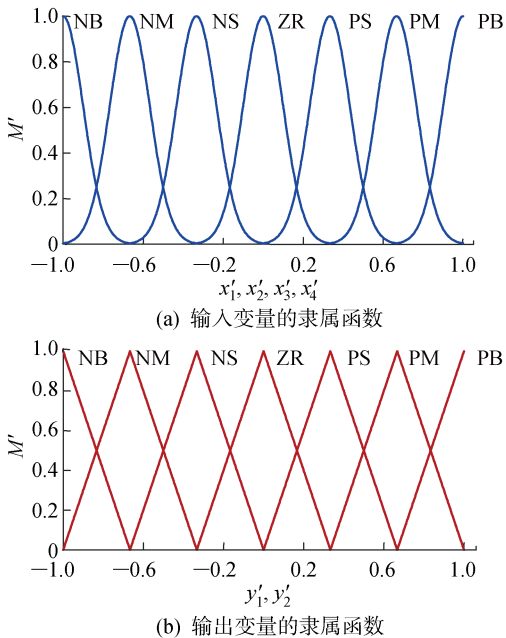


图 8 隶属函数的选择

Fig. 8 Choices for membership function

其中,输入变量隶属函数采取具有连续性的高斯型函数,从而使隶属函数在误差接近 0 的区域分辨率较高,而在误差较大的区域则分辨率较低,以使系统拥有较好的鲁棒性.输出变量隶属函数则采用三角型函数,因为这种达式较为简单,形状只与直线斜率有关.与文献[16, 20]类似,模糊化采用 Mam-

dani 的最小运算规则,清晰化则采用加权平均法.

考虑到设计的模糊逻辑控制器具有较多的输入信号,而模糊规则的多样性也使得其控制范围更加广阔,模糊控制器较常规控制器具备更好的灵活性.为了进一步提高 IPFC 兼顾暂态稳定和小干扰稳定的同时减少暂态过程中潮流超调的能力,采用粒子群算法对控制器参数 $L_1 \sim L_6$ 进行优化.具体步骤如下.

步骤 1 确定控制器优化目标,基于时间与误差平方乘积积分(ITSE)这一性能指标设计目标函数^[21],提高暂态稳定性,增强潮流跟随性能、扰动抑制性能.

对于潮流调控,模糊控制器强制使功率跟随参考值,总体偏差越小越好,因此选取线路功率的偏差 ΔP_L 来反应潮流超调量.对于暂态过程,如果发电机转子角度差能变小,则自然有利于功角稳定,因此选取转子角差 $\Delta\delta$ 来反映系统功角稳定性.对于阻尼控制,如果发电机转速变化率较小,则振荡抑制效果较好,因此选取转速差 $\Delta\omega$ 来反映系统振荡阻尼水平.

具体目标函数 J 为

$$\min J$$

$$J[e(t)] = \int_0^{t_s} t [\lambda_1 (\Delta P_L(t))^2 + \lambda_2 (\Delta\delta(t))^2 + \lambda_3 (\Delta\omega(t))^2] dt + Fa \quad (22)$$

式中: $e(t)$ 为优化目标; t_s 为采样周期; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 均为常数; F 为罚函数系数; a 为与换流器容量约束条件有关的变量.

式(22)中将 $\Delta P_L, \Delta\delta, \Delta\omega$ 一起作为粒子群算法的优化目标,从而进一步提高 IPFC 兼顾暂态稳定和小干扰稳定的同时减少暂态过程中潮流超调的能力.在 P_L, δ, ω 取标么值的情况下, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 可取 1.当然,如果需要特别偏重某个指标,如潮流超调量 ΔP_L ,可将 λ_1 取得较大.罚函数中 F 取 10^3 ,优化过程中,若满足换流器容量的约束条件,则 a 为 0,否则 a 为 1.具体约束条件如下:

由于换流器容量存在限制,应当使 V_{seij} 和 V_{seik} 满足以下不等式约束条件:

$$V_{seij} \leq V_{seij, \max} \quad (23)$$

$$V_{seik} \leq V_{seik, \max} \quad (24)$$

步骤 2 设置参数 $L_1 \sim L_6$ 的初始值,并采用粒子群优化控制参数.

步骤 3 计算目标函数值.通过在 Simulink 中运行与目标函数相关的仿真程序,计算式(24)的值.

步骤 4 判断优化后的 V_{seij} 和 V_{seik} 的值是否满

足约束条件(23)~(24). 若满足约束条件,则令式(22)中惩罚项的参数 a 取值为 0. 若不满足约束条件,则令式(22)中惩罚项的参数 a 取值为 1.

步骤 5 判断迭代次数是否达到最大迭代次数. 若否,则转步骤 3,进行下一次优化迭代;若是,则选择目标函数值最小的一组参数值作为最终的最优解.

步骤 6 为了使控制器能够适应多种性能,应该选择对应的多种场景进行优化,具体如下:

在场景 1 中, $t=12\text{ s}$ 时在发电机 G_1 机械功率中添加幅值为 0.1 p.u. ,频率为 0.67 Hz ,持续时间为 0.5 s 的扰动源;

在场景 2 中, $t=9\text{ s}$ 时在节点 l 处设置三相短路接地故障, $t=9.15\text{ s}$ 故障切除;

在场景 3 中, $t=8\text{ s}$ 时在发电机 G_2 机械功率中添加幅值为 0.2 p.u. ,频率为 2.67 Hz ,持续时间为 0.1 s 的扰动源.

粒子群算法参数取值为惯性因子 w 为 0.5 ,设置加速因子 c_1 为 1.5 , c_2 为 2.5 ,种群规模为 50 ,迭代次数为 100 . 优化后主要控制参数 $L_1\sim L_6$ 分别取 626.7 、 60.5 、 0.035 、 36.7 、 3.5 及 0.02 . 图 9 所示为优化过程中的具体目标函数值迭代曲线. 图中 E' 为迭代次数. 优化后的协调控制能力验证具体如第 4 节所示.

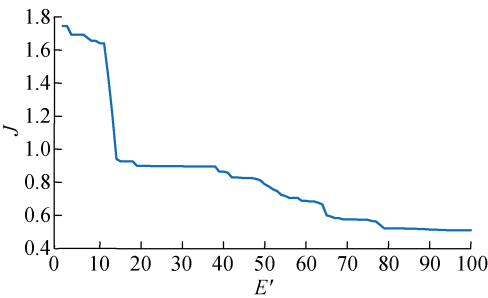


图 9 粒子群优化算法迭代收敛图
Fig. 9 Iterative convergence graph of particle swarm optimization algorithm

4 IPFC 协调控制算例验证

设置新的工况场景,验证 IPFC 提高系统暂态稳定和小干扰稳定的同时,减少暂态过程中潮流超调的能力,并与常见类 PSS 线性附加控制器作对比. 安装 IPFC 的网架结构如图 4 所示. 线性阻尼控制器设置参数同样设置为 $K=35$, $T_1=0.2$, $T_2=0.05$, $T_3=0.3$, $T_4=1$.

算例 1 $t=0$ 时投入 IPFC, $t=5\text{ s}$ 时正式启动各控制器, $t=10\text{ s}$ 时在发电机 G_1 机械功率中添加

幅值为 0.15 p.u. ,频率为 1.67 Hz ,持续时间为 0.3 s 的扰动源.

算例 2 $t=0$ 时投入 IPFC, $t=5\text{ s}$ 时正式启动各控制器, $t=10\text{ s}$ 时在节点 1 处设置三相短路接地故障, 10.15 s 故障切除.

算例 3 $t=0$ 时投入 IPFC, $t=5\text{ s}$ 时正式启动各控制器, $t=12\text{ s}$ 时将主控线路有功功率调节至 2.1 p.u. .

算例仿真结果如图 10~13 所示. 图 10 给出了算例 1 中线路 ij 有功潮流对比. 图 11 给出了算例 1 中发电机 G_1 和 G_2 转子角度差 $\Delta\omega$ 的对比. 从图 10 中可以看出,在加入扰动后,未投 IPFC 时线路功率上升到了约 2.35 p.u. ,投入 IPFC 并使用线性阻尼控制后上升到了约 2.1 p.u. ,而投入 IPFC 并使用协调控制时仅上升到了约 2.05 p.u. ,后者要小于前两者. 并且从图 11 的转角差对比中可以看出,协调控制在暂态时降低了发电机功角的第一摆振幅,提高了系统的功角稳定性.

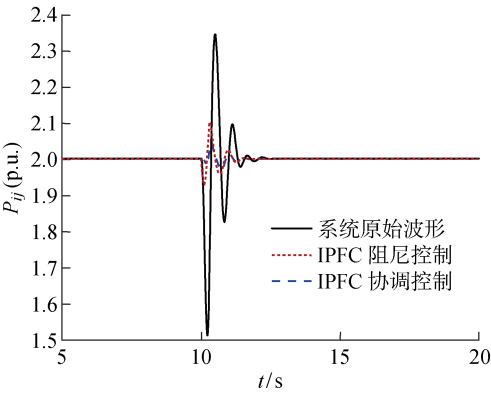


图 10 算例 1 中线路有功潮流对比
Fig. 10 Comparison of active power flow in example 1

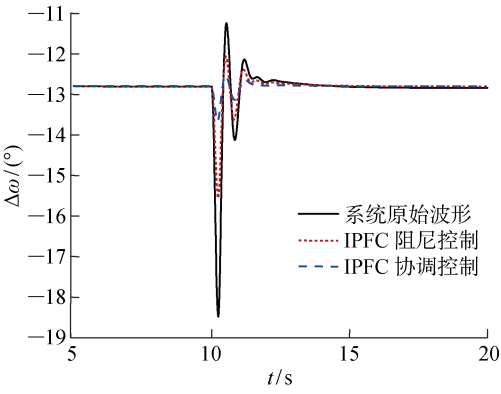


图 11 算例 1 中转角差对比
Fig. 11 Comparison of angle difference in example 1

图 12 给出了算例 2 中线路 ij 有功潮流对比. 可以看出,短路切除后,未投 IPFC 时线路功率上升

到了约 4.4 p. u.,投入 IPFC 并使用线性阻尼控制后上升到了约 2.5 p. u.,而投入 IPFC 并使用协调控制时仅上升到了约 2.15 p. u.,要小于前两者,保证了有功功率波动在更为合理的范围内.并且可以看出,自由振荡时,协调控制更好地增强了系统的阻尼水平,平息了系统的后续振荡.

图 13 给出了算例 3 中线路有功潮流对比.可以看出,投入 IPFC 并使用线性阻尼控制后最大超调量约为 0.08 p. u.,而投入 IPFC 并使用协调控制时仅超调了约 0.025 p. u.,可见,协调控制较好地限制了潮流的超调量,能更好更快地追踪到目标参考值.

综合 3 个算例可见,所提 IPFC 协调控制策略在提高了系统暂态稳定和小干扰稳定的同时,减少了暂态过程中的潮流超调,且可适应于多种运行场景,具有较好的泛用性,有利于考虑安全性和稳定性的电力系统低碳运行.

荷消纳增加、惯性降低、随机波动性增大所带来的稳定控制难题,研究了 IPFC 多目标协调控制策略.采用 MRGA 算法和 Phillips-Heffron 模型,量化了 IPFC 控制目标间的交互影响,选择了附加控制器的叠加位置,削弱了稳态调控与动态控制间的交互影响.进一步地,针对暂态过程,设计了模糊逻辑控制器及协调策略,结合粒子群算法优化了控制器参数,在提高了暂态稳定和小干扰稳定的同时,减少了暂态过程中的潮流超调,增强了 IPFC 在不同系统运行工况下的协调能力,为装置在实际工程应用中的协调控制提供技术支撑,有利于考虑安全性和稳定性的电力系统低碳运行.

参考文献:

[1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, *et al.* Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2017, 37(1): 1-9.

[2] 李国庆,宋莉,李筱婧. 计及 FACTS 装置的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 36-42.
LI Guoqing, SONG Li, LI Xiaojing. Available transfer capability calculation considering FACTS controllers[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2009, 29(19): 36-42.

[3] 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, 2014.
XIE Xiaorong, JIANG Qirong. Flexible AC transmission systems: Principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.

[4] NIKOOBAKHT A, AGHAEI J, PARVANIA M, *et al.* Contribution of FACTS devices in power systems security using MILP-based OPF[J]. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2018, 12(15): 3744-3755.

[5] 吴熙,殷天然,祁万春,等. 考虑新型拓扑结构的统一潮流控制器五端功率注入模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 155-162.
WU Xi, YIN Tianran, QI Wanchun, *et al.* Five-terminal power injection model of UPFC considering novel topology structure [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(19): 155-162.

[6] BHOWMICK S, DAS B, KUMAR N. An indirect UPFC model to enhance reusability of Newton power flow codes[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**,

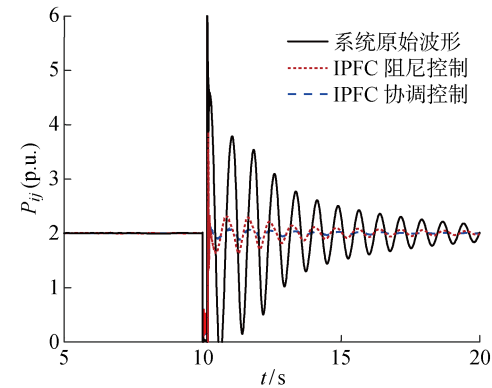


图 12 算例 2 中线路有功潮流对比

Fig. 12 Comparison of active power flow in example 2

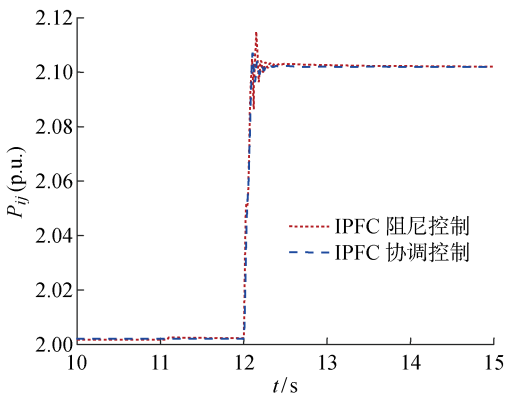


图 13 算例 3 中线路有功潮流对比

Fig. 13 Comparison of active power flow in example 3

5 结论

为了更有效地解决“双碳”背景下,电力系统负

- 2008, 23(4): 2079-2088.
- [7] LAKA A, BARRENA J A, CHIVITE-ZABALZA J, *et al.* Analysis and improved operation of a PEBB-based voltage-source converter for FACTS applications[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2013, 28(3): 1330-1338.
- [8] NITHYA G, JANANISRI D, SOWJANYA M. Performance assessment of IPFC in power transmission systems[C]// **2014 IEEE National Conference on Emerging Trends In New & Renewable Energy Sources and Energy Management (NCET NRES EM)**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 83-86.
- [9] GYUGYI L, SEN K K, SCHAUDER C D. The interline power flow controller concept: A new approach to power flow management in transmission systems[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1999, 14(3): 1115-1123.
- [10] ZHANG Y, ZHANG Y, CHEN C. A novel power injection model of IPFC for power flow analysis inclusive of practical constraints[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 21(4): 1550-1556.
- [11] ZARGHAMI M, CROW M L. The existence of multiple equilibria in the UPFC power injection model[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2007, 22(4): 2280-2282.
- [12] 祁万春, 高伯阳, 孙文涛, 等. 基于 PSASP 的 IPFC 功率注入模型研究[J]. **电力电容器与无功补偿**, 2019, 40(6): 152-158.
- QI Wanchun, GAO Boyang, SUN Wentao, *et al.* Study on IPFC power injection model based on PSASP[J]. **Power Capacitor & Reactive Power Compensation**, 2019, 40(6): 152-158.
- [13] 高伯阳, 吴熙, 王亮, 等. 线间潮流控制器技术现状分析及展望[J]. **浙江电力**, 2019, 38(2): 7-14.
- GAO Boyang, WU Xi, WANG Liang, *et al.* Technical status and prospect of interline power flow controller[J]. **Zhejiang Electric Power**, 2019, 38(2): 7-14.
- [14] FARDANESH B, SCHUFF A. Dynamic studies of the NYS transmission system with the Marcy CSC in the UPFC and IPFC configurations[C]// **2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1126-1130.
- [15] AZBE V, MIHALIC R. The control strategy for an IPFC based on the energy function[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2008, 23(4): 1662-1669.
- [16] 张曼, 张春朋, 姜齐荣, 等. 统一潮流控制器多目标协调控制策略研究[J]. **电网技术**, 2014, 38(4): 1008-1013.
- ZHANG Man, ZHANG Chunpeng, JIANG Qirong, *et al.* Study on multi-objective coordinated control strategy of unified power flow controller[J]. **Power System Technology**, 2014, 38(4): 1008-1013.
- [17] 张鹏翔, 曹一家, 王海风, 等. 相对增益矩阵方法在柔性交流输电系统多变量控制器交互影响分析中的应用[J]. **中国电机工程学报**, 2004, 24(7): 13-17.
- ZHANG Pengxiang, CAO Yijia, WANG Haifeng, *et al.* Application of relative gain array method to analyze interaction of multi-functional facts controllers[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2004, 24(7): 13-17.
- [18] 江全元, 邹振宇, 吴昊, 等. 基于相对增益矩阵原理的柔性交流输电系统控制器交互影响分析[J]. **中国电机工程学报**, 2005, 25(11): 23-28.
- JIANG Quanyuan, ZOU Zhenyu, WU Hao, *et al.* Interaction analysis of facts controllers based on rga principle[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2005, 25(11): 23-28.
- [19] PARIMI A M, ELAMVAZUTHI I, SAAD N. Damping of inter area oscillations using interline power flow controller based damping controllers[C]// **2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 67-72.
- [20] 黄振宇, 刁勤华, 孙岩, 等. UPFC 的模糊调制控制研究[J]. **电力系统自动化**, 2000, 24(2): 36-41.
- HUANG Zhenyu, DIAO Qinhua, SUN Yan, *et al.* Study on fuzzy modulation control of UPFC[J]. **Automation of Electric Power System**, 2000, 24(2): 36-41.
- [21] 冯增喜, 任庆昌, 彭彦平, 等. 基于单纯形法的 MFAC 参数寻优[J]. **控制工程**, 2016, 23(3): 405-410.
- FENG Zengxi, REN Qingchang, PENG Yanping, *et al.* Optimizing the parameters of MFAC based on the simplex method[J]. **Control Engineering of China**, 2016, 23(3): 405-410.

(本文编辑:陈晓燕)