

# HVDC 中发电机控制与直流控制之间的 MAS 协调策略

刘群英<sup>1</sup>, 刘天琪<sup>1</sup>, 刘小江<sup>1</sup>, 刘起方<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 中国科学院成都分院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对交直流电网中因为直流控制与发电机控制欠协调而导致的交流联络线功率低频振荡问题, 运用 MAS 与参数约束非线性优化算法结合来解决直流控制与送端机组间的协调。该方法将直流控制与发电机控制分别用 Agent 代理, 参数约束非线性优化算法嵌入各 Agent 模块进行局部参数优化计算, 并向协调 Agent 提供各自的整定参数, 通过协调 Agent 统一调整, 最终实现直流控制与送端机组间控制参数的优化调节, 在全局协调的方式下增强交流联络线低频振荡的阻尼。文章以南方电网贵广直流和天广直流为实例验证了该方法的有效性。

**关键词:** 电力系统; 直流控制; 参数约束非线性最优; MAS; 电压振荡; 协调控制

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)11-0022-04

## 0 引言

所谓电力系统低频振荡, 是指在系统中发生频率较低的、增幅的机械 - 电气振荡, 或称机电振荡。因控制器间的不协调也会引发该类型的振荡。随着越来越多的控制器在电力系统应用, 这种振荡开始影响电力系统的安全与稳定。针对该振荡, 提出了许多解决办法, 但建模均是以假设各控制器建模基点基本一致为前提, 并运用线性分析方法建立理想模型。而实际电力系统交直流电网中各控制器都属于非线性的且控制方式差异很大, 建模基点很难一致, 用上述办法解决电力系统交直流电网中因为控制器间的不协调引起的振荡是不现实的, 因此, 交直流电网控制器间的振荡问题一直未能得到很好的解决。近年来由于交直流电网的不断扩展, 这一问题变得更加突出, 对该课题的研究也具有重要意义。针对该问题目前国内外已提出不少解决办法, 如文献 [1] 提出的参数约束非线性最优算法和文献 [2] 提出的基于文献 [1] 的直流调制的协调优化算法, 这些方法在一定程度上增强了抑制振荡的阻尼, 但参数的整定基本靠工程经验试凑获得, 缺乏随系统动态变化的灵活性。本文提出的基于 Agent 的参数约束非线性优化算法可以弥补这方面的不足。该方法使用非线性优化算法来约束各控制器行为, 结合 MAS 的主动性、极快的适应性和协调能力来进行参数的调整, 在全局目标下协调各控制器的动作。直流控制器与附近发电机的控制协调后, 能进一步提高整个交直流系统的动态特性。利用 MAS 技术的突出优势, 能够避免传统方法可能引起的延迟、同

步、可靠性和通信等问题。本文以南方电网中贵广直流和天广直流因直流控制和附近发电机控制间不协调引起的交流联络线——惠河双回和天平双回的功率振荡问题为例, 阐述了上述思路的具体应用, 以期为我国交直流系统的稳定性研究提供一点新的参考。

## 1 协调控制系统的 MAS 构建

通常情况下, 发电机控制器与直流控制等元件模型联接框图如图 1, 其中虚线框内表示各 Agent 所代理的元件类别。

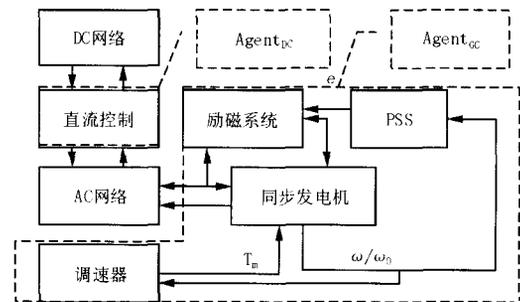


图 1 交直流端元件联接框图

Fig 1 Linked diagram of AC/DC elements

图 1 中, DC 和 AC 网络接口的输入和输出量均为电压和电流, 箭头表示元件相互间量的关联。其中直流控制用 Agent<sub>dc</sub> 代理, 发电机控制用 Agent<sub>gc</sub> 代理, 如图 1 虚线框所示。

据图 1, 建立直流控制和附近发电机控制的 MAS 体系结构。直流控制考虑贵 - 广、天 - 广两条直流线, 包括 4 个控制器: 直流 11 和直流 12、直流 21 和直流 22, 4 个控制用 Agent<sub>dc</sub> 代理并负责其协调工

作。发电机控制包括:PSS、励磁系统和调速器,三者用 Agent<sub>GC</sub>代理并协调其工作。Agent<sub>BC</sub>、Agent<sub>CC</sub>两者的协调由 Agent<sub>COOR</sub>处理。相应的 MAS结构如图 2所示,图中所有箭头表示信息流向,Agent间的通信语言采用 KQML 格式,协调机制采用请求—应答方式。

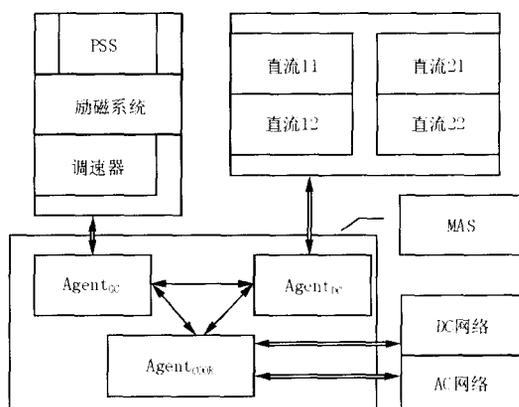


图 2 MAS系统结构关系

Fig 2 Relationship of MAS system structure

直流 11:贵广线整流侧控制;直流 12:贵广线逆变侧控制;直流 21:天广线整流侧控制;直流 22:天广线逆变侧控制;↔:总信息交互;→:信息流向。

## 2 参数约束非线性算法简介

不失一般性,发电机、发电机励磁控制、直流控制等装置的模型,均可用同一类型的一组非线性微分方程表示,如式(1)所示。

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

式中:  $x$  为状态矢量;  $z$  为代数变量的矢量;  $u$  为输入矢量;  $y$  为输出矢量;  $f, g, h$  为非线性函数。

由式(1)可知,对各控制器方程的求解问题其实就是电力系统中的非线性规划问题,即

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ \text{s.t. } & g_j(x) = 0 \quad j=1, \dots, m_e \quad x \in R^n \\ & g_j(x) \leq 0 \quad j=m_e+1, \dots, m \quad x \in R^n \end{aligned} \quad (2)$$

式中:目标函数  $f(x)$  是凸的且两次可微;等式函数中  $g_j(x)$  是仿射的;不等式中  $g_j(x)$  是凸的;  $g_j(x) \leq 0$  和  $x_{low} \leq x \leq x_{up}$  所包围的区域是可行区域  $R$ ,即如  $x \in R$ ,则  $x$  是可行的。

为求解式(2)表示的非线性规划问题,原始约束问题的无约束 Lagrange 函数为:

$$L(x, u) = f(x) - \sum_{j=1}^m u_j g_j(x) \quad (3)$$

式中:  $x \in R^n$ , Lagrange 乘子  $u = (u_1, \dots, u_m)^T \in R^m$ 。由文献[1]提出的预备定理可知,当且仅当  $x$  和  $u$  定义一个 Kuhn-Tucker 点时,即

$$\begin{cases} \nabla_x L(x, u) = 0 \\ g_j(x) = 0 \quad j=1, \dots, m_e \\ g_j(x) \leq 0 \quad j=m_e+1, \dots, m \\ u_j g_j(x) = 0, \quad j=m_e+1, \dots, m \\ u_j \geq 0, \quad j=m_e+1, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x$  和  $u$  是 Lagrange 函数  $L(x, u)$  的解,是式(2)非线性规划的最优解,  $u_j$  为  $u$  的分量。

在式(3)的求解中,本文采用二次近似法,在每一步迭代中定义一个二次子问题,使式(3)的二次子问题近似最小化。给定一当前迭代  $x$ ,通过求解二次子问题得到一搜索方向  $d$ ,即

$$\min q(d) = \frac{1}{2} d^T B d + \nabla_x f(x)^T d \quad (5)$$

$$\text{s.t. } s_j(x) = g_j(x) + \nabla_x g_j(x)^T d \leq 0 \quad j=1, \dots, m \quad d \in R^n$$

式中:  $B \in R^{n \times n}$  为式(3)的 Hessian 矩阵,是对称、正定的;  $\nabla_x$  为对  $x$  的微分。

假设  $\bar{d}$  为式(5)的解,且对应的 Lagrange 乘子满足 Kuhn-Tucker 条件,则可用

$$\bar{x} = x + \bar{a} \bar{d} \quad (6)$$

得到新的迭代,其中收敛条件

$$L(\bar{x}, u) - L(x, u) \leq \epsilon \quad (7)$$

可通过选择合适的  $\bar{a}$  来满足。

文章采用文献[5]提出的对偶算法来求解式(5),得到最优搜索方向  $\bar{d}$  和对应的 Lagrange 乘子  $u$ ,同时确定使式(6)中的 Lagrange 函数最小的、新的迭代方向。对于  $\bar{a}$  和  $B$  的确定及该算法的详细描述参见文献[1]。

该算法将作为模块嵌入各 Agent,本文涉及的所有控制元件模型的求解都通过相应 Agent 使用该算法模块来获得,得出的最优解由各相应 Agent 传送到协调 Agent,由协调 Agent 在全局约束条件下进行验算,验证各局部最优解在全局条件下的合理性。

图 1 中每个元件表示成状态空间模型形式,并在运行点附近线性化,然后连接所有的线性化方程,得到最终组合的系统方程表达式:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ Y = Cx + Du \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)与约束条件结合起来,得到形如式(1)

的总表达式。

系统总表达式的求解由协调 Agent 完成, 同样采用上述算法, 求解结果为全局最优解。

### 3 基于 Agent 的非线性协调优化算法在南方电网中的运用

本文用电力系统仿真软件 NETOMAC 对南方电网贵广、天广两直流线进行算例仿真。直流控制取 3 个基本参数、和电流裕度  $I_M$  作为协调参数, 发电机控制取时间常数  $T_1$ 、 $T_2$  和增益  $K$  作为协调参数。运行初始, 贵广线取贵州安顺电厂, 天广直流线取天生桥电厂发电机控制参数, 直流初始电压  $V_d = 525$  kV 和初始电流  $I_d = 3$  kV。安顺 - 肇庆及天生桥 - 广州北郊的换流站整流侧均采用定电流控制, 逆变站均采用定熄弧角控制。在 10% 功率扰动下, 取惠河线 (惠水 - 河池) 和天平线 (天生桥 - 平果) 的有功  $P_e$  为输出量, 来讨论协调两条直流线后交流联络线功率振荡的改善情况。各控制参数如表 1 所示。

表 1 贵广、天广直流线和发电机控制参数

Tab 1 Control parameters of DC lines and generators of Gui-Guang and Tian-Guang power system

直流控制参数		$I_M$		
初始参数	贵广	15°	17°	0.5
	天广	15°	17°	0.4
协调后参数	贵广	16°	18°	0.7
	天广	15°	17°	0.5
发电机控制参数		$T_1$	$T_2$	$K$
初始参数	安顺电厂	0.30	0.15	10
	天生桥电厂	0.50	0.20	10
协调后参数	安顺电厂	0.40	0.35	15
	天生桥电厂	0.30	0.30	10

其仿真曲线如图 3 所示。

由图 3(a)、(b) 协调前后仿真曲线对比可见, 通过协调南方电网中贵广直流和天广直流, 惠河和天平两线低频振荡得到明显改善, 由此证明了本文提出的基于 Agent 的参数约束非线性优化算法的有效性。

### 4 结束语

本文提出了基于 Agent 的参数约束非线性优化算法, 并建立了基于 Agent 的智能模型, 旨在解决发电机控制和直流控制间的协调问题。运用 NETOMAC 对南方电网仿真模型进行的仿真结果证明, 本文提出的方法是有效的, 不仅改善了南方电网直

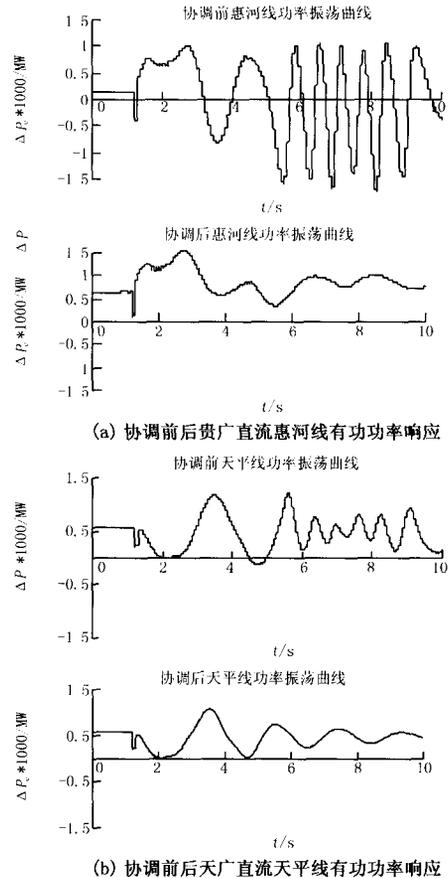


图 3 贵广、天广直流协调前后系统响应曲线

Fig 3 Response curves of Gui-Guang and Tian-Guang DC lines before and after coordination

流系统因为控制器间动作不协调引起的低频振荡, 而且具有参数调整快、响应迅速的特点, 对改善南方电网的稳定性及安全可靠具有实际意义。

### 参考文献:

- [1] LEI Xian-zhang, Lerch N L, Povh D. Optimization and Coordination of Damping Controls for Improving System Dynamic Performance [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 473-480.
- [2] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 5-9. L U Hong-chao, L I Xing-yuan, WANG Lu, et al Coordination and Optimization of HVDC Modulations in Multi-feed HVDC Transmission System [J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 5-9.
- [3] 管秀鹏, 孙元章, 赵国梁, 等. 南方电网西电东送暂态功率传输极限研究 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 1-5. GUAN Xiu-peng, SUN Yuan-zhang, ZHAO Guo-liang, et al Research on Transient Power Transfer Limit of Power

- Transmission from West China to East China via South China Electric Power Grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 1-5.
- [4] 赵林度. 大型机电故障诊断技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2001.  
ZHAO Lin-du Large-scale Machine Electrical Fault Diagnosis Technology[M]. Beijing: Chinese Petrol Chemistry Press, 2001.
- [5] 金小明, 李兴源, 刘红超, 等. 南方电网多馈入直流与交流系统的稳定与控制研究 [Z]. 成都: 西南电力设计院, 四川大学, 2002.  
J N Xiao-ming, LI Xing-yuan, LU Hong-chao, et al

Stability and Control of Multi-feed DC/AC System South China Electric Power Grid[Z]. Chengdu: Southwest Power Design Institute and Sichuan University, 2002

收稿日期: 2004-09-15; 修回日期: 2004-11-23

作者简介:

刘群英 (1977 - ), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流, 协调控制; E-mail: lqy1205@sohu.com

刘天琪 (1962 - ), 女, 教授, 主要研究方向为高压直流输电, 电力系统安全与稳定, 配电自动化。

### MAS coordination strategy between generator controllers and DC controllers HVDC system

LU Qun-ying<sup>1</sup>, LU Tian-qi<sup>1</sup>, LU Xiao-jiang<sup>1</sup>, LU Qi-fang<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2 Chengdu Branch, China Science Institute, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** According to the low-frequency power oscillation in AC link lines caused by the not-coordinated DC controllers and generator controllers in AC/DC grid, an approach of the parameter-constrained nonlinear optimized algorithm combined MAS is proposed. In this method, both DC controllers and generator controllers are respectively deputized by different Agents. The parameter-constrained nonlinear optimized algorithm is embedded in every Agent to finish the local parameter optimization analysis, and then provide them to the coordination Agent. By the coherent coordination, the optimal regulation of control parameters between DC controllers and generator controllers will be finished and the damp against the low frequency oscillation in AC link lines is realized under integral coordination. By taking the Gui-Guang and Tian-Guang DC system of south grid as examples, the feasibility of the approach is identified.

**Key words:** power system; DC control; Parameter-constrained nonlinear optimum; MAS; voltage oscillation; coordinated control

(上接第 21 页 continued from page 21)

### Line loss calculation of 10 kV distribution network based on remote terminal measurement apparatus

GU Xiu-fang<sup>1</sup>, LU Qing<sup>2</sup>, GUAN Chang-yu<sup>3</sup>, KANG Hai-zhen<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Inner Mongolia Industrial University, Hohhot 010080, China; 2 North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 3 Hohhot Power Supply Bureau, Hohhot 010050, China)

**Abstract:** Remote terminal measurement units, FTU and TTU, are commonly designed in some of lines and at load terminal of public distribution transformer to promote the level of distribution automation, which provide full and reliable data for line loss calculating precisely. This paper points out that three-phase real-time data that acquired by FTU and TTU can be resolved into three sequences of data and then state estimation can be made on each sequence of network to get the operation conditions of the whole network. Investment may be reduced greatly because that state estimation needn't full measurements. At the same time, it can make the calculation result of line loss more credible. Finally, a practical example rectifies the method is feasible.

**Key words:** distribution network; line loss; state estimation; FTU; TTU