基于多目标粒子群-稀疏提升算法的电网频率反馈优化控制

任海鹏^{†1},霍 龙¹,锁 军²

(1. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室 西安理工大学, 陕西 西安 710048;

2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院,陕西西安 710100)

摘要:频率反馈控制策略是维持电网频率稳定性的主要手段.本文建立了频率反馈控制系数和电网拓扑与电网频率稳定性的小信号分析模型,推导得出了能改善电网频率稳定性的频率反馈控制系数的参数范围.提出了基于多目标粒子群的稀疏提升算法(multi-objective particle swarm optimization sparse promoting algorithm, MOPSO-SPA),进行频率反馈控制系数矩阵的优化,提高了电网频率响应性能并降低了成本代价.用本文提出的算法设计了IEEE-39标准测试系统和陕北局部电网的频率反馈控制系数,并进行仿真对比,验证了算法的高效性和优越性.

关键词:频率稳定性;反馈控制系数;多目标粒子群优化;稀疏提升

引用格式:任海鹏,霍龙,锁军.基于多目标粒子群--稀疏提升算法的电网频率反馈优化控制,控制理论与应用, 2019, 36(2):199-206

DOI: 10.7641/CTA.2018.80044

Optimization of frequency feedback control in power grid based on multi-objective particle swarm optimization sparse promoting algorithm

REN Hai-peng^{†1}, HUO Long¹, SUO Jun²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing,

Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Province, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Frequency feedback control is one of the main approaches to maintain the frequency stability of power gird. The small-signal model for frequency stability analysis is built considering frequency feedback control coefficient and power grid topology. The range of frequency feedback control coefficient to improve the frequency stability of power grid is derived using the small-signal model. The sparse promoting algorithm based on multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm is introduced to optimize frequency feedback control coefficient matrix. The optimal control coefficient matrix derived by the proposed method enhances the performance of perturbation response as well as reduces the cost. The MOPSO sparse promoting algorithm is used to design the frequency feedback control coefficient matrix of IEEE–39 benchmark and Northern Shaanxi local power grid, the results show the proposed method has better performance and higher efficiency compared with the existing counterpart.

Key words: frequency stability; feedback control coefficient; multi-objective particle swarm optimization; sparse promoting

Citation: REN Haipeng, HUO Long, SUO Jun. Optimization of frequency feedback control in power grid based on multi-objective particle swarm optimization sparse promoting algorithm. *Control Theory & Applications*, 2018, 36(2): 199 – 206

1 引言

按照物理性质,电网稳定性可分为频率稳定性、电压稳定性和功角稳定性等^[1].频率稳定性反映了电网

电 扰动时有发生,这些扰动可能导致电网的频率崩溃, 网 进而引发如级联故障或大停电^[2-3]等更加严重的后果,

整体能量的供需平衡. 电网中负荷波动、线路断路等

收稿日期: 2018-01-15; 录用日期: 2018-07-02.

[†]通信作者. E-mail: renhaipeng@xaut.edu.cn; Tel.: +86 13379268118.

本文责任编委: 杨萍.

陕西省重大基础研究项目(2016ZDJC-01),陕西省特支计划——科技创新领军人才项目(2018),西安市碑林区科技计划项目(GX1503, GX1713),西 安市科技计划项目(2017080CG/RC043(XALG010))资助.

Supported by the Key Program of Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2016ZDJC-01), Shaanxi Special Support Program for Science and Technology Innovation Leader (2018), the Research and Development Project of Beilin District of Xi'an City (GX1503, GX1713) and the Xi'an Science and Technology Project (2017080CG/RC043 (XALG010)).

造成巨大的损失.因此,分析和改善电网的频率稳定 性具有重要意义.

电网作为复杂网络的实例[4],复杂网络的一些分 析方法对于电网稳定性分析具有重要的指导意义,针 对实际电网与通信网络等网络相依互联的现象,文 献[5]运用渗透理论揭示了网络拓扑与电网电压鲁棒 性的关系.除了宏观的拓扑对电网频率稳定的影响, 电网中一些特殊的局部结构,如:根节点(dead ends)^[6] 和某些模体(motif)^[7],分别是破坏和有利于电网频率 稳定性的重要因素. 文献[8]分析了电网的节点阻尼、 转动惯量和网络拓扑耦合强度等参数对电网频率稳 定性的影响.在此基础上,文献[9]实现了电网中虚拟 惯量的优化配置,提高了电网受小扰动时的稳定性. 虽然上述工作都涉及到网络拓扑对电网稳定性的影 响,但均未考虑发电机自身调速器的作用.基于下垂 特性的调速器,是根据发电机频率对输入机械功率进 行反馈调节的手段,对频率稳定性具有重要作用.而 频率反馈系数对调速器性能和稳定性都有重要影响. 本文建立了包含调速器的电网频率稳定性分析小信 号模型,从网侧对调速器的频率反馈控制系数、网络 拓扑和小扰动时的频率稳定性三者之间的关系进行 了分析,为调速器的频率反馈系数设计提供了依据.

随着电力系统同步相角测量单元(phasor measurement unit, PMU)^[10]和广域监测系统(wide area measurement system, WAMS)^[11]等技术的发展, 使节点间(区 域间)可实时通信,便于实现利用其它节点信息的广 域协同控制. 文献[12]提出了基于邻居节点状态信息 的频率控制策略,相比利用节点自身状态信息的传统 控制策略,具有更好的频率波动抑制能力.但文献[12] 的控制策略需要额外通信线路来满足邻居节点的信 息交换,该方法中如何确定线路的数量、位置和频率 反馈控制系数大小仍是需要解决的问题. 电网节点间 通信线路增多有利于节点间的信息利用和提高控制 性能,与此同时增加成本代价,文献[13]基于交叉方 向乘子法和梯度信息提出了稀疏提升算法,用于控制 器反馈系数矩阵的优化设计,既提高了控制性能又兼 顾了成本代价. 文献[14]将文献[13]的算法用于电力 系统稳定器的反馈系数设计,并用IEEE-39节点系统 进行仿真验证,结果是仅增加2条通信线路就可以很 好地抑制区域间低频振荡现象. 但是, 文献[13]的算法 也有不足之处:1)用遍历权重的方式处理性能和成本 这一对矛盾目标.其权重分辨率和遍历效率是一对难 以均衡的矛盾. 2) 目标函数是高维且非凸的, 运用梯 度信息进行寻优无法保证全局最优.同时,对于非凸 问题无法得到最优权值.3) 算法只能用于线性(或线 性化)系统,扩展性不强.针对文献[13]存在的问题,本 文提出了基于多目标粒子群的稀疏提升算法(MOPSO sparse promoting algorithm). 粒子群优化是一种群体 智能并行优化算法,通过个体间的协作和竞争进行搜索,具有全局优化能力,并且粒子群算法不要求待优化函数具有可微、可导、连续等性质,收敛速度快,适用于高维的、存在多个局部极值的优化问题^[15].相比文献[13]算法,本文提出的基于多目标粒子群的稀疏提升算法效率更高,解集是更优的帕累托前沿.基于多目标粒子群的稀疏提升算法不仅能应用于线性系统,对于难以得到梯度信息的非线性系统依然有效.

本文内容组织如下:第2节建立了包含调速器的电 网小信号模型,分析了频率反馈系数、电网拓扑和频 率稳定性三者之间的关系.第3节提出了基于多目标 粒子群的稀疏提升算法,并将其用于频率反馈系数矩 阵的设计.第4节用IEEE-39节点标准测试系统和陕北 局部电网对第3节提出的算法和文献[13]的算法进行 了对比仿真测试,对比验证了本文提出算法的优越性.

2 电网的频率反馈系数分析

2.1 含有调速器的电网模型

电网中发电机节点的动力学特性[8]:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i, \\ J_i \dot{\omega}_i + D_i \omega_i = P_{\mathrm{m}i} - \sum_{j=1}^n L_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j), \end{cases}$$
(1)

其中:下标 $i, j = 1, \dots, n$ 为发电机节点编号, n是电 网中同步发电机的个数, J_i, D_i 分别是发电机节点i的 惯性常量和阻尼系数, θ_i, ω_i 分别是在同步旋转坐标 系下发电节点i 的转子相角和角频率偏差,

$$L_{ij} = U_i U_j \Im(Y_{ij}) \in L_{\text{red}}$$

称为节点*i*与节点*j*之间线路的传输容量,矩阵*L*_{red}是 电网通过Kron化简^[16]得到的拉普拉斯矩阵.通过 Kron化简可以得到只包含发电机节点的电网模型,为 分析工作带来便利.假设:1)传输线路损耗可以忽略. 2)节点电压为额定常数.*U_i*,*U_j*分别是节点*i*和节点*j* 的电压幅值.*Y_{ij}*为节点*i*和节点*j*之间线路的导纳, ③(*Y_{ij}*)表示取导纳虚部,即不考虑引起线路损耗的电 阻部分.新能源发电节点在采用适当控制方式(例如 太阳能发电逆变器采用下垂控制^[17])时可以统一描述 成式(1)的模型.另外,利用虚拟同步机控制方式的新 能源节点的外特性与同步发电机一致^[18],也可以用 式(1)描述.

发电节点的调速器频率反馈控制如下:

$$\dot{P}_{\mathrm{m}i} = -\sum_{j=1}^{n} \beta_{ij} \dot{\theta}_j = -\sum_{j=1}^{n} \beta_{ij} \omega_j.$$
⁽²⁾

将式(2)积分可以得到其等价形式:

$$P_{\mathrm{m}i} = P_{\mathrm{m}i}^0 - \sum_{j=1}^n \beta_{ij}\theta_j,\tag{3}$$

其中: P_{mi}^0 为节点*i*的标称输入功率, 当*i* = *j*时, β_{ii} 是 节点*i*自身的频率反馈系数; 当*i* \neq *j*时, β_{ij} 是节点*i*和 节点*j*之间的频率反馈系数.将式(3)代入式(1)可得含 有调速器的电网节点动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i, \\ J_i \dot{\omega}_i + D_i \omega_i = \\ P_{\mathrm{m}i}^0 - \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \theta_i - \sum_{j=1}^n L_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j). \end{cases}$$
(4)

2.2 频率反馈系数分析

设电网节点模型(4)的稳定平衡点为(θ_i^*, ω_i^*), $i = 1, 2, \cdots, n$,则电网实际的工作点(θ_i, ω_i)满足 $\theta_i = \theta_i^* + \Delta \theta_i, \omega_i = \omega_i^* + \Delta \omega_i$.其中($\Delta \theta_i, \Delta \omega_i$)是稳定平衡点附近的小扰动.则电网模型(4)的小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta \theta_i = \Delta \omega_i, \\ J_i \Delta \dot{\omega}_i + D_i \Delta \omega_i = \\ -\sum_{j=1}^n \beta_{ij} \Delta \theta_i - \sum_{j=1}^n \hat{L}_{ij} \sin(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j), \end{cases}$$
(5)

其中拉普拉斯矩阵由 $L_{\rm red}$ 变为 $\hat{L}_{\rm red}$.

$$\hat{L}_{ij} \in \hat{L}_{red}, \ \hat{L}_{ij} = L_{ij} \cos(\theta_i^* - \theta_j^*)$$

传统的发电机调速器采用本机频率反馈控制,式 (5)中 $\beta_{ii} \neq 0$,所有 $\beta_{ij} = 0, i \neq j$,则其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\bar{L}_{\rm red} - K & -H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中:

$$\Delta \theta = [\Delta \theta_1 \ \Delta \theta_2 \ \cdots \ \Delta \theta_n]^{\mathrm{T}},$$
$$\Delta \omega = [\Delta \omega_1 \ \Delta \omega_2 \ \cdots \ \Delta \omega_n]^{\mathrm{T}},$$

0为零矩阵, I为单位矩阵, K是频率反馈系数矩阵, 当 $\beta_{ij} = 0, i \neq j$ 时, K第i行对角线元素为 β_{ii}/J_i , 对 角矩阵H第i行对角线元素为 D_i/J_i , \hat{L}_{red} 第i行的每个 元素除以 J_i 所得的矩阵.

对式(6)中拉普拉斯矩阵 \bar{L}_{red} 进行特征值分解可 得 $B = P\bar{L}_{red}P^{-1}$.其中矩阵P是对应的特征向量矩 阵, B是对应的特征值矩阵.矩阵 \bar{L}_{red} 的特征值满足 $\lambda_{L1} \leq \lambda_{L2} \leq \cdots \leq \lambda_{Ln}$.对式(6)进行初等变换 $Z_1 = P\Delta\theta, Z_2 = P\Delta\omega$,可得与式(6)等价的矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -B - K & -H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}.$$
 (7)

式(7)代表的小信号模型的状态变量之间无耦合,则 式(7)的第*i*个特征值可表示为

$$\lambda_{\pm,i} = \frac{-\lambda_{\mathrm{H}i} \pm \sqrt{\lambda_{\mathrm{H}i}^2 - 4(\lambda_{\mathrm{L}i} + \lambda_{\mathrm{K}i})}}{2},\qquad(8)$$

其中: $\lambda_{Ki} = \beta_{ii}/J_i > 0$ 为对角矩阵K的第i个特征值, $\lambda_{Hi} = D_i/J_i > 0$ 为对角矩阵H的第i个特征值, λ_{Hi} 表 示电网节点阻尼系数和惯性常量对式(7)特征值的影 响, λ_{Li} 表示电网拓扑结构对式(7)特征值的影响, λ_{Ki} 表示发电节点的频率反馈系数对式(7)特征值的影响.

为了保证式(7)的电网小信号模型稳定,要求式(8) 表示的特征值都具有负实部,即

$$\sigma = \max_{i=1,2,\dots,n} \mathbb{R}(\lambda_{\pm,i}) < 0, \tag{9}$$

其中: ℝ(·)表示取实部, σ为式(8)中所有特征值的最 大实部.

σ所属的特征值对系统的瞬态响应性能和稳定性 起重要作用,通常希望σ为负且越小越好.通过改变节 点的频率反馈系数 β_{ii} ,能够改变σ的大小.图1是不同 惯性常量*J*时σ随频率反馈系数 β_{ii} 的变化曲线.频率 反馈系数 β_{ii} 在一定范围内增大能够改善电网频率稳 定性,但超过一定值,σ不再变化.假设对任意节点有 $D_i = D, J_i = J 且 \beta_{ii} = \beta. 令式(8)等于零,可得能$ $改善稳定性的频率反馈系数的上限值<math>\beta_{\text{limit}}$:

$$\beta_{\text{limit}} = \frac{D^2}{4J} - \lambda_{\text{L1}}.$$
 (10)





Fig. 1 σ changing with frequency feedback coefficient β_{ii} under different inertia constant J

这一上限值是针对 $\beta_{ij} = 0, i \neq j$ 得到的. 对于 $\beta_{ij} \neq 0, i \neq j$ 的情况也可以得到类似推导, 但是结果 将更加复杂. 下面将利用优化方法设计 $\beta_{ij} \neq 0, i \neq j$ 时的频率反馈系数矩阵.

3 频率反馈系数矩阵优化

3.1 电网区域式频率反馈控制

通过电力系统中的通信网络,节点调速器可以获 取其他节点的状态信息,进而综合考虑电网整体的频 率变化对本机机械输入功率进行调节.根据通信网络 拓扑结构的不同,可以将控制方式分为分散式(decentralized)、区域式(localized)和集中式(centralized)^[19]. 图2是3种不同控制方式的示意图.从图2可以看出,电 网中相同的物理层能量传输拓扑结构,由于信息层通 信拓扑结构的不同,对应了不同的控制方式.

在式(2)所示的发电节点调速器反馈控制中,当所 有β_{ij}=0, *i*≠*j*时,是如图2(a)表示的分散式控制,即 任意两节点之间无通信线路,仅存在节点自身的状态 反馈,此时通信成本最低,但控制性能最差;当所有 $\beta_{ij} \neq 0$ 时, 是图2(c)表示的集中式控制, 即任意两节点 之间建有通信线路, 此时控制性能最好, 但通信成本 最高; 当部分 $\beta_{ij} = 0, i \neq j$ 时, 是图2(b)表示的区域式 控制, 即部分节点之间有通信线路, 这种控制方式既 能提升控制性能, 又能避免过高的通信成本, 结合了 分散式和集中式控制的优点. 然而, 如何合理确定频 率反馈系数矩阵中的反馈系数, 是需要解决的问题.





Fig. 2 Illustration of 3 control patterns according to communication topology

3.2 频率反馈系数矩阵的稀疏提升优化

对于线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 u + B_2 \eta, \\ u = -Kx, \end{cases}$$
(11)

其中:向量x为 $n \times 1$ 维状态变量,矩阵A为 $n \times n$ 维系 统矩阵,向量u为 $n \times 1$ 维控制量, B_1 为 $n \times n$ 维输入矩 阵,向量 η 为 $n \times 1$ 维噪声向量,表征外界扰动, B_2 为 $n \times n$ 维噪声增益矩阵,矩阵K是 $n \times n$ 维反馈增益矩 阵.

对线性系统(11),反馈系数矩阵的稀疏提升可以归结为在稳定性和系统动力学约束下,求解既能提高系统性能又能保证控制结构稀疏性的反馈系数矩阵*K*:

$$\begin{cases} \min \lim_{t \to \infty} \{x^{1}Qx + u^{1}Ru\} + \tau \|K\|_{0}, \\ \text{s.t.} \quad \dot{x} = Ax + B_{1}u + B_{2}\eta, \\ u = -Kx, \\ \|A - B_{1}K\|_{2} < 0. \end{cases}$$
(12)

问题(12)的待优化变量是反馈系数矩阵*K*.该优 化问题的目标函数分为2部分:第1部分是线性二次型

$$J_{\mathrm{J}1} = x^{\mathrm{T}}Qx + u^{\mathrm{T}}Ru,$$

为系统的动态性能和控制量指标. 第2部分是反馈系数矩阵的零范数 $J_{J2} = ||K||_0$,表示反馈系数矩阵中非零元素的个数,对应稀疏性指标. 在调速器频率反馈系数矩阵中,非零元素越多意味着所需的通信线路越多. τ 是权重系数,将系统动态性能和控制量指标与稀疏性指标加权变成单一指标. J_{J1} 可以由Lyapunov方程和矩阵的迹直接求解^[14]:

$$\begin{cases} J_{J1} = \text{trace}(B_2^{\mathrm{T}} P B_2), \\ \text{s.t.} (A - B_1 K)^{\mathrm{T}} P + P(A - B_1 K) = \\ -(Q + K^{\mathrm{T}} R K). \end{cases}$$
(13)

式(12)中前两个约束条件是系统动力学约束,最后一 个约束条件是闭环系统的稳定性约束.

3.3 基于多目标粒子群的稀疏提升算法

粒子群优化是一种群智能算法. 假设群体中有 M个粒子, 每个粒子是一个N维向量, 则算法的搜索 公式为

$$\begin{cases} V_m^p(k+1) = \omega(k)V_m^p(k) + c_1 r_{m,1}^p(X_m^{p,pbest} - X_m^p(k)) + c_2 r_{m,2}^p(X^{p,gbest} - X_m^p(k)), \\ X_m^p(k+1) = X_m^p(k) + V_m^p(k+1), \end{cases}$$
(14)

式中: m = 1, 2, ..., M是粒子的索引值. k表示算法 的迭代次数, 设算法的最大迭代次数为 k_{max} , 每个粒 子都具有 $N \times 1$ 维位置向量 $X_m(k)$ 和 $N \times 1$ 维飞行速 度向量 $V_m(k)$; $X_m^p(k)$ 是第k代粒子m的位置向量的 第p个元素, $V_m^p(k)$ 是第k代粒子m的速度向量的第 p个元素. X_m^{pbest} 为粒子m的个体向导粒子; X^{gbest} 为 全局向导粒子; c_1, c_2 为加速常数; $r_{m,1}, r_{m,2}$ 是对应粒 子m的两个随机数向量, $r_{m,1}^p$ 是向量 $r_{m,1}$ 的第p个元 素, $r_{m,2}^p$ 是向量 $r_{m,2}$ 的第p个元素, 为0–1均匀分布的 随机数, $p = 1, 2, ..., n^2$, n是频率反馈系数矩阵K的 维数; ω 是惯性权重系数, 本文采用线性递减权值: $\omega(k) = (\omega_0 - \omega_{end})(k_{max} - k)/k_{max} + \omega_{end}, \omega_0$ 为初 始惯性权重, ω_{end} 为最后一次迭代时的惯性权重.

由于待优化变量是 $n \times n$ 维矩阵 $K = (K_{ij})_{n \times n}$, 而粒子的位置向量X为 $N \times 1$ 维.因此,用堆积映射 将 $n \times n$ 维矩阵K和 $N \times 1$ 维的向量X之间进行转换:

$$V_{c}(K) = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix}^{T} = X, \quad (15)$$

反之, $V_{\rm c}^{-1}(X) = K$.

本文提出如下性能指标:

$$J_{\rm J1} = \int_0^\infty \left(x^{\rm T}(t) Q x(t) + u^{\rm T}(t) R u(t) \right) {\rm d}t, \quad (16)$$

式中J_{J1}可以通过仿真得到. 文献[13]只能解决线性系统(11)反馈系数矩阵的稀疏提升问题,而本文算法对于非线性系统同样适用. 当用于非线性系统时,只需要用式(16)替换式(13).

由于J_{J1}和J_{J2}是一对相冲突的目标函数,因此面临2个目标的均衡问题. 文献[13]根据式(12),通过加

权系数 τ 把 J_{J1} 和 J_{J2} 相加变为单目标函数. 然后, 按照 一定的步长遍历加权系数 τ , 对应每个 τ 解得一个反馈 矩阵K. 这种策略的不足在于权重分辨率和遍历效率 的矛盾难以均衡. 针对这一问题, 本文采用Pareto最优 解理论实现多目标优化.

在Pareto解集中的所有解都是"最优"的,因为不存在任何解支配这些解,所以没有解比它们更好.不同于单目标PSO,MOPSO的个体向导粒子和全局向导粒子都是从Pareto解集中产生的,关于Pareto解集的描述可参考文献 [20].本文建立2个精英集:可行解精英集 Φ_{feasible} 和一般精英集 Φ_{common} ,来管理个体向导粒子、全局向导粒子和最终解集.基于多目标粒子群的稀疏提升算法步骤如下:

步骤1 初始化多目标粒子群算法参数.设置惯 性权重 ω 、加速常数 c_1, c_2 、随机数向量 $r_{m,1}, r_{m,2}$ 及最 大迭代次数 k_{max}, k 为粒子群算法的迭代次数, 令k =1.初始化第1次迭代时每个粒子的位置向量和速度向 量中的每个元素为0-1均匀分布的随机数,设置可行 解精英集 Φ_{feasible} 的最大容量 N_{feamax} ,即最多存储 N_{feamax} 个粒子的信息.采用线性递减权值,设置初始 惯性权重 ω_0 ,最后一次迭代时的惯性权重 ω_{end} .

步骤 2 计算粒子群中每个粒子的性能目标函数和稀疏性目标函数.每个粒子的位置向量 $X_m(k)$ 都代表一个解,即一个频率反馈系数矩阵 K_m ,用式(15)所示堆积映射的逆映射将 $X_m(k)$ 转换成 K_m .对于式(11)所示的线性模型,用式(13)计算性能目标函数 J_{J1} ;对于式(4)所示的非线性模型,通过仿真用式(16)计算每个粒子所对应的性能目标函数 J_{J1} ,其中矩阵Q和矩阵R为单位对角矩阵.用 $J_{J2} = ||K_m||_1$ 计算每个粒子所对应的稀疏性目标函数.

步骤3 更新一般精英集 Φ_{feasible} 和可行解精英 集 $\phi_{\text{common.}}$ 由于可行Pareto最优解所代表的频率反馈 系数矩阵K对应的动力学模型应是稳定的,所以目标 函数J_{J1}较小;而不可行Pareto最优解所代表的频率反 馈系数矩阵K对应的节点动力学模型应是不稳定的, 所以目标函数J11应较大.为此,本文定义一个阈值 $J_{\text{threshold}}$,当 $J_{\text{J1}} \leqslant J_{\text{threshold}}$ 时, J_{J1} 所对应的Pareto最 优解是可行Pareto 最优解;反之,当 $J_{J1} > J_{threshold}$ 时, J_{J1} 所对应的Pareto最优解是不可行Pareto最优解. 设 第k次迭代产生了 $N_{\text{fea}}(k)$ 可行Pareto最优解.如果此 时可行解精英集 Φ_{feasible} 中已经存储了N(k)个历史可 行解, 若 $N_{\text{fea}}(k) + N(k) < N_{\text{fea max}}, 则将<math>N_{\text{fea}}(k)$ 个 可行Pareto最优解对应的粒子的信息全部存储到可行 解精英集 Φ_{feasible} 中,否则在 $N_{\text{fea}}(k) + N(k)$ 个可行 Pareto最优解采用欧式距离法^[21]选出最好的 N_{feamax} 个可行解存入可行解精英集 Φ_{feasible} . 一般来说精英集 Φ_{common} 不设置最大容量,存储每一代的所有Pareto最

优解.

步骤 4 更新个体向导粒子的位置向量 X_m^{pbest} 和 全局向导粒子的位置向量 X^{gbest} . 若k=1,则每个初 始粒子的位置向量设置为该粒子的个体向导粒子的 位置向量; 否则,根据粒子m第k代的2个目标函数可 知更新粒子m的个体向导粒子的目标函数为 $J_{m1 \min}$ 和 $J_{m2 \min}$,具体方法如下:

若

$$J_{J1}(X_m(k)) < J_{m1\min}, \ J_{J2}(X_m(k)) < J_{m2\min}$$

则 令 $J_{m1 \min} = J_{J1}(X_m(k)), J_{m2 \min} = J_{J2}(X_m(k))$ 且 $X_m^{pbest} = X_m(k);$ 否则, X_m^{pbest} 保持不变.采用欧式距 离法^[21]在一般精英集中确定全局向导粒子 X^{gbest} .具 体方法为将一般精英集中所有粒子以目标函数 J_{J1} 为 横坐标,目标函数 J_{J2} 为纵坐标排列在二维笛卡尔坐 标系中,找出一般精英集中粒子的目标函数 J_{J1} 的最 小值 $J_{1\min}$,找出一般精英集中粒子的目标函数 J_{J2} 的 最小值 $J_{2\min}$.过 $J_{1\min}$ 垂直横轴方向作直线,过 $J_{2\min}$ 的 量的性能指标所在位置($J_{1\min}, J_{2\min}$).比较直角坐 标系中每个粒子到位置($J_{1\min}, J_{2\min}$)的欧式距离, 取2个性能指标到($J_{1\min}, J_{2\min}$)的欧式距离最小的粒 子即为全局向导粒子 X^{gbest} .

步骤5 更新每个粒子的位置和速度.运用式 (14)所示的粒子群算法迭代公式更新每个粒子的位置 和速度.

步骤6 判断迭代次数是否到达初始化所设置的最大迭代次数 k_{max} ,若没有达到最大迭代次数 k_{max} , 即 $k \leq k_{\text{max}}$,则返回步骤3;否则,结束循环,以可行 解精英集 Φ_{feasible} 中稀疏性目标函数 J_{J2} 最小的粒子的 位置向量为最终的优化结果.

上述算法步骤中,一般精英集 Φ_{feasible} 用于产生个体向导粒子和全局向导粒子,可行解精英集 Φ_{common} 用于存储优化结果,第 k_{max} 迭代得到的可行解精英集 Φ_{feasible} 即优化问题的最终解集.一般精英集 Φ_{common} 既存储可行解,也存储不可行解.之所以没有舍弃不可行解,是因为很多不满足约束条件的Pareto最优解都处在约束范围的边缘,经过几次迭代后就可以回到约束范围内.保留这部分解可以增加粒子的多样性,减小算法早熟陷入局部极值的概率.

4 算例分析

本节将第3节提出的基于多目标粒子群的稀疏提 升算法用于IEEE-39标准测试系统和陕北局部电网的 调速器频率反馈系数矩阵的优化.算法的参数设置如 表1所示.

集中式控制不考虑频率反馈系数矩阵的稀疏性, 可用线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)求解. 传统的分散式控制无需通信线路, 即稀疏 性最大时, 可以运用第2节中式(10)对频率反馈系数矩 阵进行优化. 区域式控制用文献[13]的算法和本文提 出的基于多目标粒子群的稀疏提升算法对频率反馈 系数矩阵进行优化. 其中, 文献[13]算法只能用于线性 电网模型(11), 并运用式(13)直接计算目标函数*J*_{J1}. 而本文算法还可用于非线性的电网模型(4), 运用式 (16)通过仿真方式求解目标函数*J*_{J1}. 式(13)和式(16) 中矩阵*Q*和*R*取单位矩阵.

表1 算法参数设置

Table 1 Parameters setting of the proposed algorithm

参数	取值
最大迭代次数kmax	200
加速常数c1	2.8
加速常数c2	1.3
粒子数M	100
可行解精英集容量N _{feamax}	50
初始惯性权重 ω_0	0.9
最终惯性权重 ω_{end}	0.4

如图3所示,为IEEE-39标准测试系统示意图.该系统有10个发电节点,分别为节点30至39,在仿真中被称为发电节点1至10.如图4所示为IEEE-39标准测试系统频率反馈系数矩阵的非零元素示意图.实心圆点为节点自身反馈,空心圆点为不同节点之间的反馈.

IEEE-39标准测试系统的优化结果如表2所示.由表2可知,集中式控制的性能最好,但所需通信线路最多.分散式控制无需通信线路,但性能最差.区域式控制中,文献[13]算法和本文算法分别比集中式控制通信线路少42条、43条.文献[13]算法、本文基于线性模型的算法和本文基于非线性模型的算法性能分别比分散式控制的性能提高了16.23%,18.16%和24.11%.







- 图 4 IEEE-39标准测试系统频率反馈系数矩阵的非零元素示 意图: (a) 文献[13]算法结果共需3条通信线路,分别位 于发电节点1与发电节点3,6,9之间; (b) 本文算法共需2 条通信线路,分别位于发电节点5和6之间,发电节 点7和8之间
- Fig. 4 Illustration of non-zero elements of frequency feedback coefficient matrix in IEEE–39 benchmark: (a) Result using algorithm in [13] needs 3 communication lines, which are among generator node 1 and generator nodes 3, 6, 9, respectively; (b) Result using the proposed method needs 2 communication lines, which are among generator node 5 and 6, generator nodes 7 and 8, respectively
- 表 2 IEEE-39标准测试系统频率反馈系数矩阵优化 结果

Table 2 The results of frequency feedback coefficient matrix of IEEE–39 benchmark

控制方式及算法	性能(J _{J1})	通信线路条数
集中式控制 分散式控制	15.696 18.865	45 0
区域式控制 (文献[13]算法)	16.231	3
区域式控制 (本文算法,线性模型)	15.966	2
区域式控制 (本文算法, 非线性模型)	15.200	2

图5为陕北局部电网示意图,包含火电、水电、风能和光伏4种类型共58个发电节点,将所有输电线路和发电节点的参数归算到330 kV电压等级,黑色直线代表输电线路,空心圆代表发电节点,圆中的数字为节点编号.

陕北局部电网的优化结果如表3所示.由表3可知, 区域式控制中,文献[13]的算法和本文算法分别比集 中式控制通信线路少3275条、3278条.同时,文献[13] 的算法、本文基于线性模型和基于非线性模型的算法 性能分别比分散式控制提高了25.18%,30.32%和 31.39%.



图 5 陕北局部电网示意图

Fig. 5 Illustration of local power gird of north shanxi province

表 3 陕北向部电网频率反馈系数矩阵体	尤化结	果
---------------------	-----	---

 Table 3 The results of frequency feedback coefficient matrix of local north Shaanxi power grid

控制方式及算法	性能(J _{J1})	通信线路条数
集中式控制	82.598	3306
分散式控制	110.251	0
区域式控制 (文献[13]算法)	88.074	31
区域式控制 (本文算法,线性模型)	84.599	28
区域式控制 (本文算法, 非线性模型)	83.910	28

图6是陕北局部电网调速器区域式控制的时域仿 真结果. 仿真以非零的频率偏差为初始条件模拟电网 小扰动. 本文算法基于线性模型和非线性模型的频率 偏差最大值分别比基于文献[13]算法的频率偏差最大 值小20.28%, 25.10%, 且频率具有更快的同步速度. 暂态过程中基于本文线性模型和非线性模型算法的 机械功率波动比基于文献[13]方法的机械功率波动 小42.33%, 46.02%, 且收敛速度更快.

本文通过算法运行时间衡量基于多目标粒子群的稀疏提升算法的效率.由于粒子群算法的运行时间具有一定随机性,取30次实验的平均运行时间作为参考,每次实验均基于相同的计算机环境(Intel Core i5–3470, 3.20 GHz CPU, 4 GB RAM).



- 图 6 陕北局部电网调速器区域式控制的时域仿真结果: (a) (c)(e)分别是基于文献[13]算法、本文算法采用线性模型 和非线性模型时的频率偏差曲线. (b)(d)(f)分别是基于 文献[13]算法和本文算法采用线性模型非线性模型时的 机械功率曲线
- Fig. 6 Time domain waveform of north Shaanxi power gird with localized controlled governors: (a)(c)(e) are the frequency deviation curve for the algorithm in [13], the proposed method based on the linear model and the nonlinear model, respectively; (b)(d)(f) are the mechanical power curve for the algorithm in [13], the proposed method based on the linear model and the nonlinear model, respectively
- 表 4 求解陕北局部电网频率反馈系数矩阵的算法运 行时间
- Table 4 The algorithm running time to solve frequency feedback coefficient matrix of local north Shaanxi power grid

算法	运行时间/s
文献[13]算法	1802.77
本文算法(线性模型)	1207.23
本文算法(非线性模型)	1783.50

表4是求解陕北局部电网频率反馈系数矩阵的算法运行时间,本文基于线性模型和非线性模型的算法均比文献[13]的算法用时少.基于多目标粒子群的稀

疏提升算法具备固有的"并行"搜索方式,并且Pareto 最优解理论一次迭代获得多个可行解,而文献[13]算 法虽然采用梯度搜索,但算法需要进行加权遍历,在 获得更好的性能的前提下,基于多目标粒子群的稀疏 提升算法具有更短的运行时间.

5 结论

针对电网频率反馈系数矩阵优化控制的问题,本 文首先建立了包含调速器的电网小信号模型,分析了 小信号模型中调速器的频率反馈系数与电网频率稳 定性的关系,得到如下结论:一定范围内的增大频率 反馈系数将提升电网的频率稳定性,但频率反馈系数 存在上限值,当超过此上限值继续增大频率反馈系数 对改善电网频率稳定性没有帮助,反而增加了控制代 价. 提出了基于多目标粒子群的稀疏提升算法, 并将 该算法用于电网的频率反馈系数矩阵的优化,该算法 的优势如下:1)基于Pareto前沿的多目标粒子群的稀 疏提升算法可以自动均衡电网的动态性能和通信线 路成本这对矛盾,减少通信线路的同时得到较好的响 应性能: 2) 基于多目标粒子群的稀疏提升算法具有良 好的全局搜索能力和计算效率,较文献[13]的算法具 有更优的动态性能和更短的运行时间; 3) 本文算法可 以用于非线性系统,具有较好的扩展性.

参考文献:

- KUNDYR P. Power System Stability and Control. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] DOBSON I, CARRERAS B A, LYNCH V E, et al. Complex systems analysis of series of blackouts: cascading failure, critical points, and self-organization. *Chaos*, 2007, 17(2): 967 – 979.
- [3] REN H P, SONG J H, YANG R, et al. Cascade failure analysis of power grid using new load distribution law and node removal rule. *Physica A*, 2015, 442(1): 239 – 251.
- [4] WEI Zhenbo, XUN Jing. An overview on application of complex network theory in power system analysis. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 279 287.
 (魏震波, 苟竞. 复杂网络理论在电网分析中的应用与探讨. 电网技术, 2015, 39(1): 279 287.)
- [5] GAO J X, BULDYREV S V, STANLEY H E, et al. Networks formed from interdependent networks. *Nature Physics*, 2012, 8(1): 40 – 48.
- [6] MENCK P J, HEITZIG J, KURTHS J, et al. How dead ends undermine power grid stability. *Nature Communications*, 2014, 5, Article number: 3969.
- [7] DEY A K, GEL Y R, Poor H V. Motif-based analysis of power grid robustness under attacks. *Physics and Society*, 2017, arXiv: 1708.06738v1.
- [8] DÖRFLER F, BULLO F. Exploring synchronization in complex oscillator networks. 2012 IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC). Maui: IEEE, 2012: 7157 – 7170.

- [9] POOLLA B K, BOLOGNANI S, DÖRFLER F. Optimal placement of virtual inertia in power grids. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(12): 6209 – 6220.
- [10] REE J D L, CENTENO V, THORP J S, et al. Synchronized phasor measurement applications in power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(1): 20 – 27.
- [11] XIE X R, XIN Y Z, XIAO J Y, et al. WAMS applications in Chinese power systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2006, 4(1): 54 – 63.
- [12] WANG Chenwei, GREBOGI C, BAPTISTA M S. Control and prediction for blackouts caused by frequency collapse in smart grids, *Chaos*, 2016, 26(9): 22 – 29.
- [13] FU L, FARDAD M, JOVANOVIĆ M R. Design of optimal sparse feedback gains via the alternating direction method of multipliers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(9): 2426 – 2431.
- [14] DÖRFLER F, JOVANOVIC M R, CHERTKOV M, et al. Sparsitypromoting optimal wide-area control of power networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5): 2281 – 2291.
- [15] SHEN Xianjun. Adaptive Particle Swarm Optimization Algrothim and Its Applications. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
 (沈显君. 自适应粒子群优化算法及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2015.)
- [16] DÖRFLER F, BULLO F. Kron reduction of graphs with applications to electrical networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 60(1): 150 – 163.
- [17] TONG Xiangqian, WU Wenjun, REN Biying. *The Applications of Voltage Source Converter in Power System*. Shaanxi: Mechnicial Industry Press, 2012: 250 256.
 (同向前, 伍文俊, 任碧莹. 电压源换流器在电力系统中的应用. 陕西: 机械工业出版社, 2012: 250 256.)
- [18] LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2591 2603.
 (吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591 2603.)
- [19] JOVANOVIC M. Sparisty-promotion optimal control of distributed systems. [2018-01-15]. http://www-bcf.usc.edu/mihailo/talks/Banff-14.pdf.
- [20] HUANG Peijiu, LIU Jianchang, TAN Shubin, et al. Application of the hybrid multi-objective particle swarm optimization algorithm in load distribution of hot finishing mills. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(1): 93 – 100.
 (黄佩秋, 刘建昌, 谭树彬, 等. 混合多目标粒子群优化算法在热精轧 负荷分配优化中的应用. 控制理论与应用, 2017, 34(1): 93 – 100.)
- [21] GUO Xin, REN Haipeng, LIU Ding. An optimized PI controller design for three phase PFC converters based on multi-objective chaotic particle swarm optimization. *Journal of Power Electronics*, 2016, 16(2): 610 – 620.

作者简介:

任海鹏 博士, 教授, 主要研究方向为复杂系统分析与控制、混沌 无线通信, E-mail: renhaipeng@xaut.edu.cn;

霍 龙 硕士研究生,主要研究方向为电网稳定性分析与控制, E-mail: 499956843@qq.com;

锁 军 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动 化, E-mail: powersuo@163.com.