

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190437

一种基于小干扰稳定约束最优潮流的实用化校正控制方法

李佩杰, 张钧, 黄淑晨, 李滨, 韦化

(广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004)

摘要: 当系统出现小干扰稳定问题时, 采用在线校正控制的方法可以避免事故进一步扩大。基于小干扰稳定约束最优潮流(Small-Signal Stability Constrained Optimal Power Flow, SSSC-OPF), 提出了一种校正控制的调度方法。根据混成自动控制理论, 通过多次事件驱动控制使系统在经济性和安全性上趋优。由于该方法生成控制指令只需一次优化计算, 因此决策速度快, 提高了系统危急情况下调度控制的时效性, 突破了其他方法无法实用化的效率瓶颈。WSCC-9、IEEE-39 和 IEEE-145 三个系统的仿真结果表明: 所提方法计算效率高, 控制效果好, 应用前景广阔。

关键词: 小干扰稳定; 最优潮流; 校正控制; 混成自动控制; 实用化

A practical method for corrective control based on small-signal stability constrained optimal power flow

LI Peijie, ZHANG Jun, HUANG Shuchen, LI Bin, WEI Hua

(Key Laboratory of Guangxi Electric Power System Optimization and Energy-saving Technology,
Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: When the small-signal stability problem occurs, corrective control can avoid worsening the situation of power system. Based on the Small-Signal Stability Constrained Optimal Power Flow (SSSC-OPF), this paper proposes a corrective control method for dispatching. Owing to the idea of hybrid control, the proposed method can make the system approach optimal point of economy and security for power system through event-driven control in multiple times. This method only needs one optimization calculation to generate control instructions, thus it has a fast decision-making speed, significantly improves the time-efficiency of dispatching in system crisis and breaks through the efficiency bottleneck that other strategies cannot be practically implemented. The simulations on WSCC-9, IEEE-39 and IEEE-145 systems show that the proposed method has high computation efficiency, good control effect and wide prospect of application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767004 and No. 51667003).

Key words: small-signal stability; optimal power flow; corrective control; hybrid automatic control; practicability

0 引言

近年来, 太阳能和风电的高比例接入^[1-2]和跨区域长距离的大规模输电^[3-5], 导致系统振荡模式复杂^[6], 低频振荡和次同步振荡的事故时有发生, 电力系统安全稳定运行受到极大威胁。目前, 解决小干扰稳定问题的主要方法是在系统中配置 PSS、FACTS 和其他阻尼控制器^[7], 然而这种方法存在两方面问题: 一方面, 阻尼控制器从设计到投运的时间间隔太长, 投运后某些运行工况也会超出阻尼控制器的设计范围^[8-9]; 另一方面, 基于本地信号的阻尼控制器对区间振荡模式抑制效果有限, 而考虑广

域信号的阻尼控制器又受传输时滞等信道因素影响较大^[10]。因此, 阻尼控制器并不能够全面地解决小干扰稳定问题。

最近, 从调度层面对小干扰稳定进行校正控制已成为研究的热点, 当广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)监测到功率振荡后, 通过在短时间内准确、快速地调整发电机组出力, 可以抑制系统振荡, 避免事故的进一步扩大^[11]。文献[8]通过结合参与因子和特征值灵敏度提出了小干扰稳定调度控制的在线计算方法, 实现了对发电机有功出力的在线调度。文献[9]提出了一种基于数值摄动灵敏度的有功调度方法, 是这一领域研究的首个优化模型。

SSSC-OPF 也是实现小干扰稳定校正控制的最

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767004, 51667003)

有效工具之一,它是在经典最优潮流模型的基础上引入小干扰稳定约束,实现对系统临界特征值的控制,该模型能够同时实现有功调度、无功调节和小干扰稳定控制,将系统经济性和安全稳定性完美地统一在一起。目前,这方面的研究成果十分有限,文献[12]假定小干扰稳定约束为光滑约束,应用内点法强行求解 SSSC-OPF 模型,导致算法的收敛性无法从理论上得到保证。文献[13]提出了 SSSC-OPF 的非线性半定规划模型和算法,采用矩阵不等式约束解析描述小干扰稳定,但是由于辅助矩阵为稠密矩阵,计算量极大,致使该方法难以实用化。文献[14]提出了基于梯度采样的序列二次规划模型,从理论上保证了求解 SSSC-OPF 算法的全局收敛性,但是计算效率距离实用化还有一定的差距。文献[15]提出了一种考虑预防控制安全约束的 SSSC-OPF 模型,不适用于在线校正控制,所提的控制方法为满足预期稳定裕度,需经多次优化计算才能生成控制指令,决策时间长,系统在执行这些指令时可能早已过渡到另外一个状态。文献[16]提出的序列线性规划方法,通过多次迭代求解线性化后的优化模型得到有功调度策略,计算量比传统 OPF 模型增加很多。综上,目前基于 SSSC-OPF 的在线控制方法还停留在理论的探索阶段,计算效率仍然制约着其进一步实用化。

借助混成自动控制^[17]的思想,本文基于 SSSC-OPF 提出了一种校正控制的调度方法。虽然泰勒级数展开的 SSSC-OPF 模型的最优解不一定满足预期稳定裕度,但能满足潮流等其他约束要求。于是,该调度方法通过一次优化计算生成单次控制指令,再利用多次事件驱动控制使系统的安全性和经济性趋优。所提方法决策速度快,充分考虑了系统危急情况下调度控制的时效性,具有很强的实用性。WSCC-9、IEEE-39 和 IEEE-145 三个系统的仿真结果表明:所提方法计算效率高,控制效果好,具有广阔的应用前景。

1 小干扰稳定约束

1.1 小干扰稳定分析的数学模型

在进行小干扰稳定分析时,常将系统的微分代数方程进行线性化^[18]:

$$\begin{cases} \Delta \dot{s} = A\Delta s + B\Delta y \\ 0 = C\Delta s + D\Delta y \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 表示状态变量; y 表示输出变量; Δs 和 Δy 表示状态变量和输出变量在运行点附近的微小变化量; A 、 B 、 C 、 D 分别表示系数矩阵。如果矩

阵 D 是非奇异矩阵,通过化简可得到

$$\Delta \dot{s} = A'\Delta s \quad (2)$$

式中, $A' = A - BD^{-1}C$, 矩阵 A' 常被称为状态矩阵。计算 A' 的所有特征值 λ 后,可根据特征值实部判断系统的小干扰稳定性。若所有特征值的实部小于零,表明系统在运行点是小干扰稳定的,并且实部最大的特征值越小,系统振荡衰减越快,小干扰稳定裕度就越大;若某个特征值的实部大于零,则说明系统在运行点是不稳定的,存在振荡的可能。由此可知,只要约束特征值的实部即可控制小干扰稳定的裕度。

1.2 小干扰稳定约束表达式

系统第 i 个振荡模式的特征值实部 α_i 常随系统的运行点变化而变化,一般可认为 α_i 与系统的有功功率关系最为密切^[15],因此 α_i 可看作发电机有功出力 P_G 的函数,则小干扰稳定约束可以表示为

$$\alpha_i(P_G) \leq \bar{\alpha}_i \quad i \in S_C \quad (3)$$

式中: $\bar{\alpha}_i$ 为第 i 个振荡模式特征值实部的设定上限值, $|\bar{\alpha}_i|$ 即为小干扰稳定预期的稳定裕度; S_C 为临界振荡模式集合。将 α_i 函数在某一运行点 P_G^0 处进行泰勒级数展开可得

$$\alpha_i = \alpha_{i0} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial P_G} \Delta P_G + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \alpha_i}{\partial P_G^2} \Delta P_G^2 + \dots \quad (4)$$

式中: α_{i0} 为当前运行点(基态)下第 i 个振荡模式的特征值实部; ΔP_G 为发电机有功出力的变化量。当 ΔP_G 很小时,可忽略二阶及以上的高阶项,这时 α_i 可以近似表示为

$$\alpha_i \approx \alpha_{i0} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial P_G} \Delta P_G = \alpha_0 + \sum_{k \in S_G} \sigma_{ik} \Delta P_{Gk} \quad (5)$$

式中: σ_{ik} 表示第 i 个振荡模式的特征值实部对第 k 台发电机有功出力的灵敏度; S_G 表示发电机集合; ΔP_{Gk} 为系统中第 k 台发电机的有功出力变化量。为了使 ΔP_G 不要过大,防止忽略高阶项后误差过大,在小干扰稳定约束中引入一个不小于 1 的常数 F ,得到:

$$\alpha_{i0} + F \sum_{k \in S_G} \sigma_{ik} \Delta P_{Gk} \leq \bar{\alpha}_i \quad i \in S_C \quad (6)$$

显然,约束(6)是线性、光滑的,它的梯度和海森矩阵容易推导,把它加入非线性规划模型不会改变原模型的光滑性。

1.3 特征值实部对有功出力的灵敏度

根据 1.1 和 1.2 节分析可知,特征值实部 α_i 是发电机有功出力 P_G 的隐函数,通过解析的方法获得 $\partial \alpha_i / \partial P_G$ 的表达式非常复杂,这里采用数值摄动法。

数值摄动法的具体思想是先对第 k 台发电机有功出力进行微小摄动 $P_{Gk} + \varepsilon$, 重新进行潮流和特征值计算, 得出新状态下第 i 个振荡模式特征值的实部 $\alpha_{i\varepsilon}$ 。于是第 i 个振荡模式的特征值实部对第 k 台发电机有功出力的灵敏度 σ_{ik} 就可通过式(7)近似求出。

$$\sigma_{ik} = \frac{\partial \alpha_i}{\partial P_{Gk}} \approx \frac{\alpha_{i\varepsilon} - \alpha_{i0}}{\varepsilon} \quad (7)$$

式中, ε 是一个微小摄动量, 如 1 MW, 由于所有的临界特征值可一次求出, 因此所有临界振荡模式下特征值实部对第 k 台发电机的灵敏度也可以同时求出。以此类推, 可以逐批求出临界振荡模式下特征值实部对每台发电机有功出力的灵敏度。由此可见, 摄动法比较直接, 计算方便, 计算量主要集中在潮流和特征值计算上。由于对每台发电机有功出力的摄动是相互独立的, 因此完全可以采用并行计算的方式同时求取这些灵敏度。

灵敏度计算的粒度比较大, 并行效率很高, 当计算资源足够时, 即计算核数大于等于系统可控制的发电机台数时, 系统所有临界振荡模式的特征值实部对所有可控发电机灵敏度的理论计算时间等于所有临界振荡模式特征值实部对一台可控发电机机组的灵敏度计算时间。随着多核 CPU 技术的不断发展, 每个计算核心的成本在逐渐降低, 在电力系统调度中心配备大规模的并行计算平台将成为可能。

2 小干扰稳定约束最优潮流模型

建立 SSSC-OPF 非线性规划模型, 数学表达式如下。

1) 目标函数

以机组出力总调整量最小为目标函数

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i \in S_G} (P_{Gi}^+ + P_{Gi}^-) \quad (8)$$

式中: P_{Gi}^+ 表示第 i 台发电机有功出力的增加量; P_{Gi}^- 表示第 i 台发电机有功出力的减小量。

2) 等式约束, 包括两部分的内容

① 潮流方程

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in S_N} V_j Y_{ij} \cos \theta_{ij} = 0 \\ Q_{Ri} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in S_N} V_j Y_{ij} \sin \theta_{ij} = 0 \end{cases} \quad i \in S_N \quad (9)$$

式中: S_N 表示节点集合; P_{Gi} 、 Q_{Ri} 表示节点 i 的注入有功和无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 表示节点 i 的有功和无功负荷。

② 发电机有功出力平衡方程

$$P_{Gi} = P_{Gi}^0 + P_{Gi}^+ - P_{Gi}^- \quad i \in S_G \quad (10)$$

式中, P_{Gi}^0 表示优化前(基态)第 i 台发电机的有功出力。

3) 不等式约束, 包含两部分的内容

① 运行约束

$$P_{Gi}^+ > 0 \quad i \in S_G \quad (11)$$

$$P_{Gi}^- > 0 \quad i \in S_G \quad (12)$$

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \quad i \in S_G \quad (13)$$

$$\underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} \quad i \in S_R \quad (14)$$

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad i \in S_N \quad (15)$$

$$S_{ij}^2 \leq \bar{S}_{ij}^2 \quad (i, j) \in S_L \quad (16)$$

式中: \bar{P}_{Gi} 、 \underline{P}_{Gi} 表示第 i 台发电机有功出力的上、下限; \bar{Q}_{Ri} 、 \underline{Q}_{Ri} 表示无功源 i 无功出力的上、下限; \bar{V}_i 、 \underline{V}_i 表示节点 i 电压幅值的上、下限; \bar{S}_{ij} 表示线路 i - j 的最大输电容量。

② 小干扰稳定约束

$$\alpha_{i0} + F \sum_{k \in S_G} \sigma_{ik} \Delta P_{Gk} \leq \bar{\alpha}_i \quad i \in C \quad (17)$$

上述模型中变量包括发电机有功出力、无功源出力、各节点电压幅值、电压相角、发电机有功出力增加量以及减小量等, 用向量 \mathbf{x} 表示为

$$\mathbf{x} = \left[\mathbf{P}_G^T \quad \mathbf{Q}_R^T \quad \mathbf{V}^T \quad \boldsymbol{\theta}^T \quad (\mathbf{P}_G^+)^T \quad (\mathbf{P}_G^-)^T \right]^T$$

其中, 发电机功率的调整量 \mathbf{P}_G^+ 和 \mathbf{P}_G^- 是控制变量, 而励磁系统、PSS 等控制器的参数不可调。

该模型与传统 OPF 模型相比, 仅增加了约束(17), 且该约束是光滑和线性的, 依然可以采用高效的内点法求解, 增加的计算量很少。此外, 由于约束(17)考虑了多个振荡模式, 因此不会在抑制一个振荡模式后引起另外一个振荡模式起振。

该模型的优化目标函数是关于发电机调整量的 1-范数, 与常用的 2-范数目标函数相比, 能减少调整出力的发电机数量, 这符合电力系统调度的实际: 需要调整出力的发电机越少, 完成调度指令的时间越短, 控制的时效性越好。

3 校正控制调度方法

通常采用的控制方法^[15]如图 1 所示, 由于式(17)在泰勒级数展开时忽略了高阶项, 在一次优化求解模型(8)~(17)后, 系统未必能达到预期稳定裕度, 所以传统方法的一次优化过程中一般包含多次优化计算, 即反复调整式(17)中的参数 F , 直到系统特征值结果满足裕度要求后再下发控制指令。

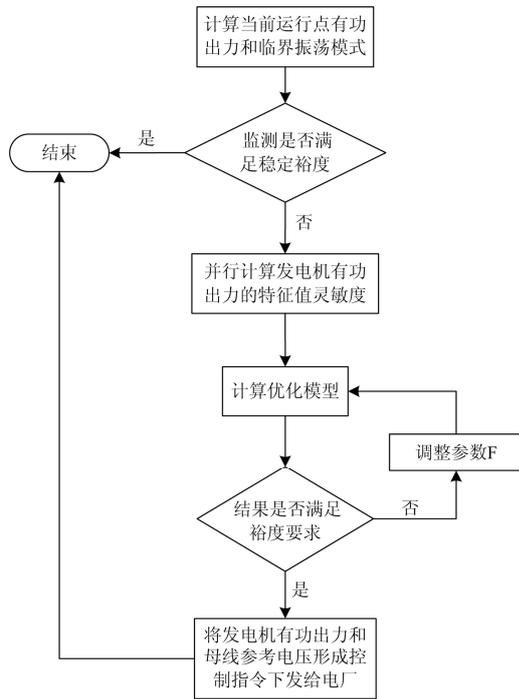


图 1 传统校正控制的流程图

Fig. 1 Flowchart of conventional corrective control method

通过分析第 2 节的优化模型知，其最优解虽然不一定满足预期稳定裕度要求(3)，但是一定满足约束(9)–(16)，由于考虑了泰勒级数展开的小干扰稳定约束和机组有功出力调整量最小的目标函数，因此其最优解的稳定裕度一般比优化之前的大，且对于调度员来说是切实可行的。基于优化模型的这一特性，提出如图 2 所示校正控制的调度方法，其思路是在将所述的模型进行一次优化计算后，就将控制指令下发给电厂，当完成调度后，再次检测当前系统是否满足稳定裕度要求，若不满足则再次重复优化，循环直至系统达到预期稳定裕度。在优化计算过程中，参数 F 始终不变。具体步骤如下：

Step 1: 根据系统状态估计等结果，计算系统该状态下发电机有功出力 P_{Gi}^0 和所有特征值，将特征值实部 α_i 大于设定上限值 $\bar{\alpha}_i$ 的所有模式作为临界振荡模式 S_C 。

Step 2: 校验系统是否满足预期稳定裕度；若不满足，形成校正控制事件。

Step 3: 对系统可控发电机的有功出力进行摄动，并行计算临界振荡模式集合 S_C 的实部 α 对可控发电机有功出力的灵敏度。

Step 4: 采用设定好的 F 参数值，计算一次优化模型(8)–(17)，得出系统发电机有功出力 P_{Gi} 和母线参考电压 V_i ，立即将这些结果作为控制指令下发

给各电厂。

Step 5: 待调度指令执行完成后，重复步骤 Step 1。

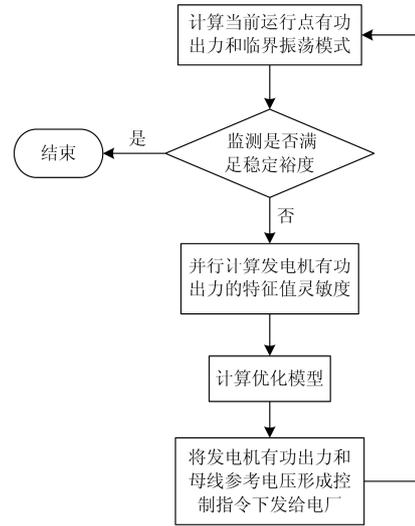


图 2 所提校正控制流程图

Fig. 2 Flowchart of proposed corrective control

对比可知，传统方法需要反复将调整后的发电机出力和母线的参考电压代入原模型中进行多次计算，直到满足系统预期稳定裕度。然而，多次计算延长了调度决策时间，导致控制指令执行后，系统仍可能存在振荡，这是由于系统可能早已过渡到另外一个运行状态，控制指令虽然满足了计算前状态的预期稳定裕度，但并不适用于当前运行状态。在紧急情况下，容易错过宝贵的控制时间窗口，无法阻止系统运行状态进一步恶化。而文中所提方法一次优化计算就生成控制指令，决策速度快，控制时效性好，且校验是以系统实际状态的稳定裕度为指标，而不是以计算前系统模型的稳定裕度为指标，更加符合调度的实际情况。根据混成自动控制的理论与实践^[17]，通过反复的事件驱动控制，可以使系统的稳定裕度和调整量两个目标趋优，达到工程上满意的控制效果。

4 计算结果与分析

为验证所提方法的有效性，本文选取 WSCC-9^[18]、New England-39^[19]和 IEEE-145^[20]三个典型系统作为测试算例，优化算法通过 Matlab 编写实现，测试环境为 Win10/PC 机 (Intel Core i7- CPU 4.0GHz, 16G 内存)。

4.1 WSCC 3 机 9 节点系统

WSCC 3 机 9 节点系统基态发电机有功出力见表 1，电压幅值范围为 0.9~1.1 p.u.，发电机有功出力上下限见文献[12]。通过计算得到系统最大特征

值实部 α_0 为 -0.05 , 系统的稳定裕度较低, 于是设 $\bar{\alpha} = -0.5$ 。为了验证所提校正控制方法能够通过多次的反复控制增大系统的稳定裕度, 假定系统在执行控制指令后, 能够与校正控制的计算结果匹配, 以此模拟实际的校正控制流程。

表 1 不同稳定裕度要求下的发电机出力及调整量

Table 1 Generator outputs and adjustments with different stability margins

	P_{G1}/MW	P_{G2}/MW	P_{G3}/MW	总调整量
基态	25.1	25.0	276.0	—
$\bar{\alpha} = -0.3$	32.8	25.0	265.9	17.8
$\bar{\alpha} = -0.4$	43.0	25.0	254.8	39.1
$\bar{\alpha} = -0.5$	74.2	25.0	221.5	103.6

图 3 为每次控制后系统最大特征值实部 α 的下降曲线, 从中可见 α 一直保持下降趋势, 这说明每次校正控制都是有效的, 通过这种反复的控制, 系统的稳定裕度趋向于预期的要求 (-0.5)。此外, 由图 3 知, 第一次控制后 α 下降最为显著, 系统的稳定裕度增加最大, 这一特性给维持系统稳定带来两点好处: 1) 紧急状态下, 控制一次后能得到很好的控制效果, 可防止事故的进一步扩大; 2) 由于每次校正控制不依赖前次的控制, 因此即使前次的控制效果因其他原因与计算结果不匹配, 后续的控制仍然能发挥作用。最后, 图 3 体现了常数 F 的值对控制次数的影响, F 值越大, 每次的修正量越小, 需控制的次数越多, 反之, F 值越小, 需要的控制次数就越少。从该系统的仿真结果推知, F 等于 1 最为理想。

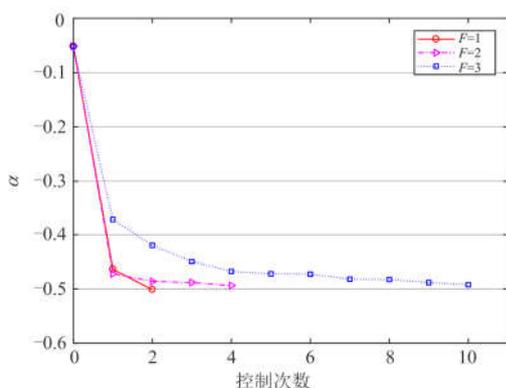


图 3 WSCC-9 系统下 α 的变化曲线

Fig. 3 Curves of α for WSCC-9

为了进一步测试不同预期稳定裕度要求下校正控制调度方法的有效性, 分别设 $\bar{\alpha}$ 为 -0.3 、 -0.4 和 -0.5 , 反复控制后, 达到预期稳定裕度要求的结果见表 1。从表 1 可看出, $\bar{\alpha}$ 越小, 系统的预期稳定

裕度要求越大, 发电机 1 的有功出力越大, 发电机 3 的有功出力越小, 机组出力的总调整量越大, 这很可能是因为发电机 1 的惯性时间常数较大, 而发电机 3 的惯性时间常数较小。系统虽经过多次控制, 但仍然是以调整量最小为目标达到预期稳定裕度, 这也表明所提校正控制的过程是一种兼顾经济性(调整量)与安全性(稳定裕度)的多目标趋优控制。

4.2 New England 10 机 39 节点系统

New England 10 机 39 节点系统参数和基态数据源于文献[19], 在此基础上用一台双馈风机替换母线 32 上的同步发电机, 风机模型见文献[20], 其他约束数据见文献[15]。

基态下系统最大特征值实部 $\alpha_0 = 0.39$, 显然, 系统处于小干扰不稳定状态, 设 $\bar{\alpha} = -0.1$, $F = 1$ 。只进行一次控制, 优化计算后系统的最大特征值实部 α 变为 -0.01 , 系统状态由小干扰不稳定变为稳定。系统的发电机有功出力的调整量如图 4 所示, 可以看到此次调度控制仅涉及了系统 10 台机组中的 2 台机组(母线 31 和母线 39), 这充分体现了 1-范数优化目标的优点, 提高了控制的可操作性, 缩短了指令执行时间, 减少了调度过程中系统状态与计算状态的偏差量, 满足了调度的时效性要求。

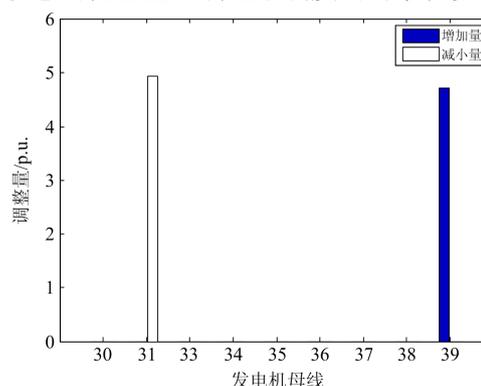


图 4 IEEE-39 系统发电机有功出力的调整量

Fig. 4 Adjustment of generator active power output for IEEE-39

4.3 IEEE 50 机 145 节点系统

IEEE-145 节点数据源于文献[20], 系统规模相对较大。为了进一步验证优化模型对系统小干扰不稳定的校正能力, 将原系统的所有负荷都放大 15% 倍以构成基态, 此时系统的最大特征值实部 $\alpha_0 = 0.055$ 。发电机有功和无功出力的下限和上限分别取基态时的 0.8 和 1.2 倍, 设 $\bar{\alpha} = -0.2$, $F = 1$ 。仍然以迭代计算的方式模拟校正控制, 三次控制后系统即可达到预期稳定裕度。

表 2 列出了该方法进行一次优化计算各部分串行和理想的并行计算时间, 串行计算时灵敏度计算最为耗时, 但在计算资源充足的条件下进行并行计

算后,改进方法的计算时间完全可以满足在线控制的要求。

表 2 IEEE-145 系统一次控制的计算时间

Table 2 Calculating time of one iteration for IEEE-145 system

	计算次数	串行总时间/s	并行总时间/s
特征值分析	1	0.14	0.14
灵敏度计算	50	7.50	0.15
SSSC-OPF	1	0.55	0.55
合计	—	8.19	0.84

本文进行小干扰稳定分析采用的是特征值分析法,它基于线性化后的模型,没有完全考虑系统的非线性行为。为了进一步验证所提校正控制方法对于系统振荡的抑制能力,分别在该系统的基态和优化后的状态下,在母线 34 上突然增加 40 MW 的负荷,然后进行 50 s 的时域仿真,发电机的转子频率变化曲线如图 5、图 6 所示,由图可知基态下系统发生了增幅的周期性振荡,而优化后系统则经过

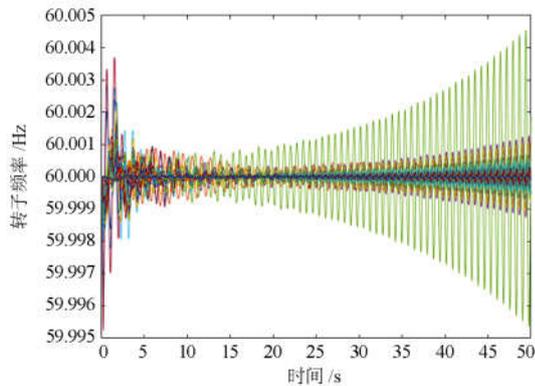


图 5 IEEE-145 系统基态下发电机转子频率曲线

Fig. 5 Rotor frequency curve of generators with base case of IEEE-145 system

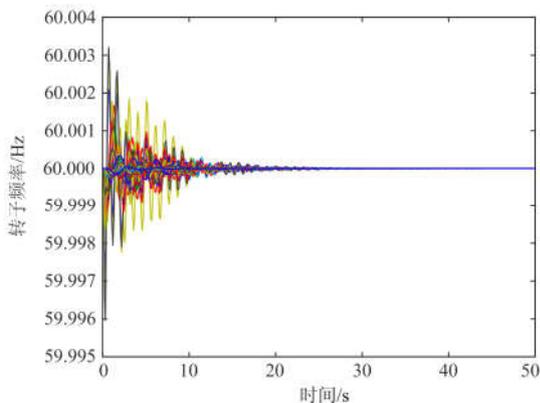


图 6 IEEE-145 系统优化后发电机的转子频率曲线

Fig. 6 Rotor frequency curve of generators after optimization for IEEE-145 system

短时振荡逐渐恢复稳定。这说明所提的校正控制方法能够有效地抑制系统的振荡,使系统恢复稳定。

5 结论

本文借鉴混成自动控制的思想,提出了一种基于 SSSC-OPF 的校正控制调度方法,该方法通过事件驱动对系统小干扰稳定性进行优化,使系统在经济性和安全性上趋优,由于只需一次优化计算就下发控制指令,有效避免了传统校正控制方法中调度时效性低的问题。通过仿真分析证明,该方法具有决策速度快、所需调度调节量少、对系统振荡抑制作用明显、易于并行计算的特点,可用于在线计算及调度控制,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 杨黎晖, 马西奎. 双馈风电机组对电力系统低频振荡特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 19-25.
YANG Lihui, MA Xikui. Impact of doubly fed induction generator wind turbine on power system low-frequency oscillation characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 19-25.
- [2] WU Meng, XIE Le, CHENG Lin, et al. A study on the impact of wind farm spatial distribution on power system sub-synchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2154-2162.
- [3] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.
YU Yixin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.
- [4] 洪峰, 陈金福, 段献忠, 等. 弱互联大区电网联络线功率振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 46-51.
HONG Feng, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, et al. Research on tie line power flow oscillation in weak interconnection power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 46-51.
- [5] 王青, 马世英. 电力系统区间振荡的阻尼与区域间送电功率关系特性[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 40-45.
WANG Qing, MA Shiying. Relationship between inter-area oscillation damping in power system and inter-area transmitted power[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 40-45.
- [6] 徐伟, 夏小琴, 赵静波, 等. 基于电气距离的低频振荡

- 关联区域和模式类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 24-30.
- XU Wei, XIA Xiaoqin, ZHAO Jingbo, et al. Relevant zone and mode type identification based on electrical distance for low frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 24-30.
- [7] 王鹏达, 陈玉蛟, 周斌, 等. 广域电力系统稳定器参数的两阶段协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 25-32.
- WANG Pengda, CHEN Yujiao, ZHOU Bin, et al. A two-stage coordinated optimization method of WAPSS parameters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 25-32.
- [8] 于之虹, 李芳, 孙璐, 等. 小干扰稳定调度控制策略在线计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6191-6198.
- YU Zhihong, LI Fang, SUN Lu, et al. An enhanced algorithm of online small signal stability control strategy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6191-6198.
- [9] CHUNG C Y, WANG L, HOWELL F, et al. Generation rescheduling methods to improve power transfer capability constrained by small-signal stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 524-530.
- [10] 杨德友, 王文嘉, 高际惟, 等. 随机数据驱动下的机电振荡参数在线提取与阻尼调制: II 基于有功调节的区间模式阻尼调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2253-2261.
- YANG Deyou, WANG Wenjia, GAO Jiwei, et al. On line electromechanical oscillation analysis and damping modulation for power system using ambient data (part II): inter area modes damping regulating based on generators redispatching[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2253-2261.
- [11] 宋墩文, 温渤婴, 杨学涛, 等. 基于多信息源的大电网低频振荡预警及防控决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 54-60.
- SONG Dunwen, WEN Boying, YANG Xuetao, et al. A multiple information sources based early warning and preventive control system for low-frequency oscillation in large-scale power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 54-60.
- [12] CONDREN J, GEDRA T W. Expected-security-cost optimal power flow with small-signal stability constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1736-1743.
- [13] 李佩杰, 韦化, 白晓清. 小干扰稳定约束最优潮流的非线性半定规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 69-76.
- LI Peijie, WEI Hua, BAI Xiaoqing. Small-signal stability constrained optimal power flow based on NLSDP[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 69-76.
- [14] LI Peijie, QI Junjian, WANG Jianhui, et al. An SQP method combined with gradient sampling for small-signal stability constrained OPF[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2372-2381.
- [15] ZARATE-MINANO R, MILANO F, CONEJO A J. An OPF methodology to ensure small-signal stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1050-1061.
- [16] 邢洁, 陈陈, 武鹏. 考虑小干扰稳定约束的有功优化调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 24-28.
- XING Jie, CHEN Chen, WU Peng. Optimal active power dispatch with small-signal stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 24-28.
- [17] 阮前途, 何光宇, 柳明, 等. AEMS 及其在上海电网的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 17-24.
- RUAN Qiantu, HE Guangyu, LIU Ming, et al. Advanced EMS and its application to shanghai power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 17-24.
- [18] SAUER P W, PAI M A. Power system dynamics and stability[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [19] YE U R H. Small signal analysis of power systems: Eigenvalue tracking method and eigenvalue estimation contingency screening for DSA[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [20] Power System Toolbox Ver. 2.0: dynamic tutorial and functions[Z]. Colborne: Cherry Tree Scientific Software, 1999.

收稿日期: 2019-04-19; 修回日期: 2019-05-21

作者简介:

李佩杰(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统小干扰稳定和优化运行; E-mail: beyondpeijie@163.com

张钧(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统小干扰稳定; E-mail: zjprogressive@st.gxu.edu.cn

黄淑晨(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统小干扰稳定。E-mail: 513637479@qq.com

(编辑 葛艳娜)