

基于高斯混合模型及近似线性规划的风电系统校正控制方法

周海强¹, 赵春祝¹, 顾婷艳¹, 薛峰^{2,3}, 高超¹, 宋晓芳^{2,3}

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;
3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要:提出一种基于高斯混合模型及近似线性规划的风电系统校正控制方法。考虑到风电及负荷功率预测误差的非高斯特性及相关性,建立了描述风电及负荷功率联合概率分布的高斯混合模型。考虑切负荷、发电机功率调整以及统一潮流控制器等控制措施,以控制代价最小为目标函数,构建了计及电压、频率及线路潮流等静态安全约束的风电系统校正控制优化问题的数学模型。为求解含不确定变量的非线性优化问题,依据高斯混合模型的性质,在稳态运行点的邻域内将非线性约束近似转化为线性约束,用线性规划方法求解,并不断迭代直至收敛。最后,将该方法应用于修改后的IEEE 10机39节点算例系统验证其有效性,与场景法的对比结果表明该方法求解效率较高,且具有较好的经济性。

关键词:风电;校正控制;高斯混合模型;灵敏度;线性规划;静态安全

中图分类号:TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205066

0 引言

静态安全校正控制是电力系统安全稳定控制的重要环节^[1],系统运行过程中,电源及负荷功率随时可能发生变化,线路开断、设备故障等事故也难以避免,一旦出现线路过载、电压过低等静态不安全现象,必须及时采取合适的校正控制措施,以避免引发连锁反应,造成更大范围的事故。截至2021年11月14日,我国风电并网装机容量已突破3亿kW^[2],为了实现我国政府提出的碳达峰和碳中和目标,未来以风电、光伏为代表的新能源占比势必会不断提高。新能源的大量接入,以及温控负荷、电动汽车和微电网等广义负荷的广泛使用,增强了电力系统源荷双侧的不确定性,给电力系统的频率安全、电压稳定等带来了重要影响。如何在计及不确定性的条件下进行风电系统校正控制决策是一个亟待解决的问题。

国内外学者对不确定系统的校正控制问题进行了大量研究,现有方法主要有场景法、机会约束规划CCP(Chance-Constrained Programming)方法、鲁棒优化方法等。文献[3]应用场景法研究了风电系统的静态电压校正控制问题,采取的校正措施包括发电

机功率再调度、需求响应、切负荷等。场景法以各种场景下控制代价(或静态安全指标)的期望值为目标函数,其约束条件包括各种场景下的潮流方程和安全约束不等式。场景的数量和代表性对解的精度影响较大,其计算量较大,一般场景法需要应用高效率抽样方法及场景削减技术生成场景集^[4]。文献[5]假设新能源预报误差服从高斯分布,基于直流潮流法和CCP方法研究了使用移相器控制以及高压直流功率调制进行过载校正控制的问题。CCP方法在一定的置信度水平下进行决策,可兼顾控制代价及安全风险,但CCP方法只能处理不确定变量服从某些特定分布的情况,而对于非线性不确定系统则缺乏系统的求解方法。鲁棒优化基于不确定性参数“最不利”的情况进行最优决策^[6],其控制策略较为保守,经济性较差。文献[7]应用分布鲁棒线性优化理论研究了考虑风电波动的电力系统静态安全校正控制问题,实现了控制策略经济性与鲁棒性的相互转化,在一定程度上提高了鲁棒控制策略的经济性。

总体而言,目前不确定性系统的校正控制方法还存在一些不足。①对于非线性确定性系统的校正控制问题,内点法、连续线性规划方法^[8]、粒子群优化算法^[9]等求解方法已较为成熟,但对于非线性不确定系统,其求解方法仍在发展之中。②对服从高斯分布的不确定变量研究较多,而对于非高斯分布不确定变量及其相关性考虑相对较少。由于高斯变量的线性组合依然服从高斯分布,故对其进行分析较为方便。但研究表明实际系统中风电及负荷功率预测误差常具有非高斯分布特性,忽略这一特点将导致分析结果有较大偏差。

针对上述问题,本文提出一种基于高斯混合模

收稿日期:2022-03-29;修回日期:2022-05-30

在线出版日期:2022-06-06

基金项目:国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U2066601);智能电网保护和运行控制国家重点实验室资助项目(SGTYHT/20-JS-221)

Project supported by the Smart Grid Joint Fund of National Natural Science Foundation of China & State Grid Corporation of China(U2066601) and the State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control(SGTYHT/20-JS-221)

型GMM(Gaussian Mixture Model)和近似线性规划ALP(Approximated Linear Programming)的风电系统校正控制方法。首先,应用GMM来描述风电及负荷功率预测误差随机向量的联合概率密度函数PDF(Probability Density Function)及相关性。其次,考虑切负荷、自动发电控制、统一潮流控制器UPFC(Unified Power Flow Controller)等控制措施,建立了计及风电及负荷不确定性的静态安全校正控制优化问题的数学模型。然后,应用灵敏度方法并结合GMM的性质,将含不确定变量的非线性校正控制问题近似转化为线性规划问题进行求解。最后,以修改后的IEEE 10机39节点系统为例验证了本文所提方法的有效性。

1 风电及负荷功率预测误差的GMM

1.1 风电及负荷功率预测误差的不确定性

建立源荷不确定变量的数学模型是风电系统校正控制的基础。实践中常用预测功率加预测误差来描述实际功率,已有研究常假设风电及负荷功率预测误差服从正态分布,但这一假设往往会存在较大偏差。研究表明风电预测误差的PDF呈现尖峰厚尾、非对称甚至多峰等特点,并且预测误差的PDF随着风电功率预测值所处区间不同而变化,很难用统一的解析函数来进行拟合^[10]。文献[11]指出不同时段和负荷水平下负荷预测误差的概率分布特性差别很大,很难用统一的PDF来描述。

电力系统中各种不确定变量之间存在不同程度的相关性,能否准确地反映其相关性对分析结果影响很大。对于服从高斯分布的相关变量,可以通过Cholesky分解将其转换为独立高斯变量的线性组合进行分析;而对于非高斯分布的相关变量,尽管可以使用Nataf变换将其相关系数矩阵转化为高斯变量的相关系数矩阵进行分析^[12],但由于大多数情况下无法获得其解析表达式,故计算过程较为复杂。

1.2 GMM

GMM以多个正态分布函数的线性加权组合逼近任意PDF,可以描述任意非独立、非正态分布随机变量的联合概率分布。GMM可根据样本数据直接拟合得到随机向量的联合PDF,并刻画变量之间的相关性,因此,GMM获得了较为广泛的应用。

随机向量 $\mathbf{x}$ 的GMM表达式 $f_{\text{GMM}}(\mathbf{x})$ 如下:

$$f_{\text{GMM}}(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\Sigma}_m) \quad (1)$$

式中: M 为高斯子项的个数; ω_m 为第 m 个高斯子项的权值,且满足 $\sum_{m=1}^M \omega_m = 1, \omega_m > 0$; $N_m(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\Sigma}_m)$ 为第 m 个高斯子项,表示期望为 $\boldsymbol{\mu}_m$ 、协方差矩阵为 $\boldsymbol{\Sigma}_m$ 的多元正态分布,其表达式如式(2)所示。

$$N_m(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\Sigma}_m) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_m)^T \boldsymbol{\Sigma}_m^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_m)\right]}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} (\det(\boldsymbol{\Sigma}_m))^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式中: n 为样本数; $\det(\cdot)$ 表示求矩阵 $(\cdot)$ 的迹。

通过调整参数 $\theta = \{\omega_m, \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\Sigma}_m | m = 1, 2, \dots, M\}$ 的取值, $f_{\text{GMM}}(\mathbf{x})$ 可以拟合任意的PDF。

对于GMM刻画的多个变量的线性组合,可以方便地获取其GMM。若 $\mathbf{X}$ 为 q 维随机向量,其线性组合 $\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{C}$ 为 p 维随机向量,其中 $\mathbf{B}$ 为 $p \times q$ 阶矩阵, $\mathbf{C}$ 为 p 维向量,则随机向量 $\mathbf{Y}$ 的GMM表达式 $f_{\text{GMM}}(\mathbf{y})$ 为^[13]:

$$f_{\text{GMM}}(\mathbf{y}) = \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(\mathbf{y} | \mathbf{B}\boldsymbol{\mu}_m + \mathbf{C}, \mathbf{B}\boldsymbol{\Sigma}_m\mathbf{B}^T) \quad (3)$$

由此可见,若风电或负荷功率为输入变量 $\mathbf{X}$,则节点电压、线路潮流等输出变量 $\mathbf{Y}$ 的统计规律可由GMM来描述。

1.3 GMM的参数估计

设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为来自随机变量 $\mathbf{X}$ 的样本, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为样本的一个取值。其对数似然(Log-likelihood)函数 $f_{\text{LL}}(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta)$ 为:

$$f_{\text{LL}}(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = \sum_{j=1}^n \ln \left(\sum_{m=1}^M \omega_m N_m(x_j | \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\Sigma}_m) \right) \quad (4)$$

使函数 f_{LL} 取得最大值的 θ 即为GMM的参数估计。 θ 常采用最大期望算法来获取^[14]。最大期望算法通过迭代计算进行参数估计,每次迭代分为2步:第1步先根据当前估计的参数 $\hat{\theta}$ 计算函数 f_{LL} 的期望值;第2步寻找能使函数 f_{LL} 期望值最大化的参数值 θ ,新得到的参数被用于下一次迭代。如此循环,直至函数 f_{LL} 收敛。

在应用最大期望算法时需要预先确定高斯子项的个数 M ,增大 M 可以提高GMM对目标变量概率分布的拟合精度,但也增加了模型的复杂性,易产生过拟合的问题。为此,可引入赤池信息量准则来评估GMM的性能,其指标 γ_{AIC} 定义如下:

$$\gamma_{\text{AIC}} = 2k_{\text{GMM}} - 2f_{\text{LL}} \quad (5)$$

式中: k_{GMM} 为GMM中待估计参数个数。 γ_{AIC} 值越小,GMM性能越优越。

以本文算例中风电场1的预测误差 ΔP_{w1} 为例,已知 ΔP_{w1} 服从TLS(T Location-Scale)分布,其位置参数、尺度参数和形状参数分别为0、0.03和5。分别采用GMM和高斯分布模型对其PDF进行拟合,得到拟合曲线见图1,图中风电功率预测误差为标么值。由图可见,GMM拟合较好地反映了风电预测误差的“厚尾”特征,其拟合精度优于高斯分布模型。

2 风电系统校正控制问题的数学模型

新型电力系统中风电、光伏的渗透率不断提高,

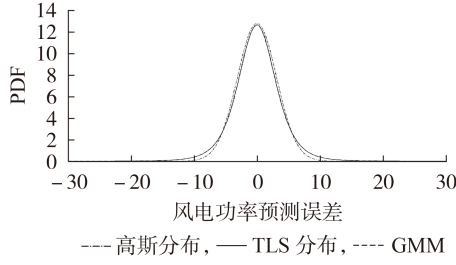


图 1 风电功率预测误差 PDF 的拟合曲线

Fig.1 Fitting curves of PDF for wind power forecasting error

其不确定性有可能导致常规校正控制策略的失效。同时,随着技术的进步,UPFC、静止无功补偿器等柔性交流输电系统设备的性价比不断提高,在电力系统中的应用日益广泛。因此,本文考虑协调发电机功率调整、UPFC、切负荷等控制措施进行校正控制,在确保系统静态安全的前提下,降低控制代价。

在计及风速及负荷预测误差的条件下,含 UPFC 的风电系统校正控制优化问题可描述为机会约束规划问题,其目标函数如下:

$$\min F = c_u P_{g,u} + c_d P_{g,d} + c_l \rho P_{l,f} \quad (6)$$

式中: F 为校正控制总费用; $P_{g,u}$ 、 $P_{g,d}$ 分别为发电机功率的增加量、减少量; c_u 、 c_d 分别为发电机增、减出力的报价; $P_{l,f}$ 为负荷预测值; ρ 为切负荷率; c_l 为切负荷代价系数。

校正控制优化问题的约束条件如下。

1) 含 UPFC 的电力系统潮流方程。

$$f(X_{\text{sys}}, X_{\text{upfc}}, u_{\text{sys}}, u_{\text{upfc}}, P_w, P_l) = 0 \quad (7)$$

式中: X_{sys} 、 X_{upfc} 分别为系统、UPFC 的状态变量, $X_{\text{sys}} = [V, \theta, f_d]^T$, V 、 θ 分别为节点电压、相角, f_d 为静态频率偏差量, $X_{\text{upfc}} = [V_{se}, V_{sh}]^T$, V_{se} 、 V_{sh} 分别为 UPFC 串、并联电压源的电压; u_{sys} 、 u_{upfc} 分别为系统、UPFC 的控制变量, $u_{\text{sys}} = [P_{g,u}, P_{g,d}, \rho]^T$, $u_{\text{upfc}} = [P_c, Q_c, V_1]^T$, P_c 、 Q_c 分别为 UPFC 传输的有功、无功功率, V_1 为 UPFC 并联变压器所连接的节点电压幅值; P_w 、 P_l 分别为风电、负荷功率。

关于计及频率变化的增广潮流计算及含 UPFC 系统的潮流计算可分别参考文献[15]和文献[16], 附录 A 对含 UPFC 系统潮流计算的原理进行了说明。

2) 发电机组出力及爬坡约束。

$$P_{g,\min} \leq P_g + P_{g,u} - P_{g,d} \leq P_{g,\max} \quad (8)$$

$$P_{g,u} \leq R_{u,\max} \Delta t, \quad P_{g,d} \leq R_{d,\max} \Delta t \quad (9)$$

式中: P_g 为发电机功率; $P_{g,\max}$ 、 $P_{g,\min}$ 分别为发电机出力的上、下限; $R_{u,\max}$ 、 $R_{d,\max}$ 分别为发电机出力向上、向下调节速率的极限; Δt 为校正控制有效时间, 可取为 15 min。

3) 切负荷比例约束。

$$0 \leq \rho \leq \bar{\rho} \quad (10)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为切负荷比例上限。

4) 静态频率、电压及线路潮流约束。

$$P_r \left\{ f_{-d} \leq f_d \leq \bar{f}_d \right\} \geq 1 - \alpha_f \quad (11)$$

$$P_r \left\{ \underline{V} \leq V \leq \bar{V} \right\} \geq 1 - \alpha_v \quad (12)$$

$$P_r \left\{ -\bar{S}_{\text{line}} \leq S_{\text{line}} \leq \bar{S}_{\text{line}} \right\} \geq 1 - \alpha_{\text{line}} \quad (13)$$

式中: $P_r \{ \cdot \}$ 为求事件 $\{ \cdot \}$ 发生的概率; $\bar{f}_d$ 、 f_{-d} 分别为频率偏差的最大值、最小值, 本文分别取 0.2、-0.2 Hz; $\bar{V}$ 、 $\underline{V}$ 分别为电压上、下限; S_{line} 为线路传输容量; $\bar{S}_{\text{line}}$ 为线路传输容量的上限; $1 - \alpha_f$ 、 $1 - \alpha_v$ 和 $1 - \alpha_{\text{line}}$ 分别为静态频率、电压和线路潮流约束预设的静态安全置信水平。

5) UPFC 安全运行约束。为确保 UPFC 安全运行, 对其状态变量的取值有一定的限制。

$$P_r \left\{ \underline{X}_{\text{upfc}} \leq X_{\text{upfc}} \leq \bar{X}_{\text{upfc}} \right\} \geq 1 - \alpha_u \quad (14)$$

式中: $\bar{X}_{\text{upfc}}$ 、 $\underline{X}_{\text{upfc}}$ 分别为 UPFC 状态变量的上、下限; $1 - \alpha_u$ 为 UPFC 安全运行约束的静态安全置信水平。

在校正控制优化问题中引入置信度可以兼顾安全风险和经济代价, 避免为了满足极少数“高风险、小概率”事件的要求而盲目地提高控制代价。已有 CCP 问题的求解方法多限于线性问题及高斯分布的不确定变量, 但由于风电系统校正控制问题中潮流方程及 UPFC 的数学模型具有强非线性, 且一般情况下 P_w 、 P_l 的预测误差呈现非高斯分布特性, 因此, 如何快速、准确地求解式(6)~(14)所描述的非线性 CCP 问题是有待解决的问题。

3 基于 ALP 的校正控制问题求解方法

对于非线性 CCP 问题, 常用的求解方法可以分为如下 2 类: 一类方法是启发式方法, 如粒子群优化算法, 由于优化过程中需要评估每个粒子在大量不确定场景下的性能, 因此其计算量巨大, 算法收敛慢, 很难付诸实施; 另一类方法设法将非线性 CCP 问题转化为线性 CCP 问题求解, 将优化控制问题与非线性潮流计算问题解耦, 交替迭代求解^[8], 本文基于此提出了一种基于 ALP 的校正控制问题求解方法。

3.1 基于灵敏度的校正控制问题线性化

校正控制优化问题的任务是寻找确保系统静态安全, 且经济代价最小的控制解 $u = [u_{\text{sys}}, u_{\text{upfc}}]$ 。下文以上标 (k) 表示迭代过程中第 k 步的变量取值, 下标 f 表示参数的预测值。在搜索解的过程中, 对于任意的初始点 $u^{(k)} = [u_{\text{sys}}^{(k)}, u_{\text{upfc}}^{(k)}]$, 通过求解潮流方程式(7)可计算得到预测场景 $(P_{w,f}, P_{l,f})$ 下系统和 UPFC 的状态变量 $X_f^{(k)} = [X_{\text{sys},f}^{(k)}, X_{\text{upfc},f}^{(k)}]$, 以及线路功率等输出变量。设 ΔP_w 、 ΔP_l 分别为风电、负荷功率预测误差, 则实际场景为 $(P_{w,f} + \Delta P_w, P_{l,f} + \Delta P_l)$, 由于实际场景具

有不确定性,故严格意义上,需要通过概率潮流计算来校验控制变量 $\mathbf{u}^{(k)}$ 能否满足安全约束方程式(11)–(14),这一过程计算量很大,而且无法为控制变量 $\mathbf{u}$ 的修正提供有针对性的指导。但如果 $\Delta \mathbf{P}_w$ 、 $\Delta \mathbf{P}_l$ 的概率分布可以用 GMM 来刻画,则上述过程可以大幅简化。

当预测误差较小时,控制变量 $\mathbf{u}^{(k)}$ 下的状态变量 $\mathbf{X}^{(k)}$ 可近似为:

$$\mathbf{X}^{(k)} \approx \mathbf{X}_f^{(k)} + \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}_w} \bigg|_{\mathbf{X}_f^{(k)}} \Delta \mathbf{P}_w + \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}_l} \bigg|_{\mathbf{X}_f^{(k)}} \Delta \mathbf{P}_l \quad (15)$$

式中: $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}_w} \bigg|_{\mathbf{X}_f^{(k)}}$ 、 $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}_l} \bigg|_{\mathbf{X}_f^{(k)}}$ 分别为状态变量 $\mathbf{X}$ 对风电、负荷功率的灵敏度。

将灵敏度矩阵 $\left[\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}_w}, \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}_l} \right]$ 记为 $\mathbf{B}_1$, 风电及负荷功率预测误差向量 $[\Delta \mathbf{P}_w, \Delta \mathbf{P}_l]^T$ 记为 $\mathbf{Z}$, 则式(15)可简写为:

$$\mathbf{X}^{(k)} \approx \mathbf{X}_f^{(k)} + \mathbf{B}_1 \mathbf{Z} \quad (16)$$

设 $\mathbf{Z}$ 的联合 PDF 表达式 $g(\mathbf{z}) = \omega_m N_m(\mathbf{z} | \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\Sigma}_m)$, 根据式(3), 可推出 $\mathbf{X}^{(k)}$ 的 GMM 表达式 $g_1(\mathbf{x})$ 为:

$$g_1(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(\mathbf{x} | \mathbf{X}_f^{(k)} + \mathbf{B}_1 \boldsymbol{\mu}_m, \mathbf{B}_1 \boldsymbol{\Sigma}_m \mathbf{B}_1^T) \quad (17)$$

至此,即可较为方便地考核其是否满足安全约束方程式(11)–(14)。

如果频率、电压、线路传输功率等静态安全置信水平低于预设阈值,则需要对控制变量 $\mathbf{u}$ 加以修正,求出第 $k+1$ 步的修正量 $\Delta \mathbf{u}^{(k+1)}$ 。考虑到 $\Delta \mathbf{u}^{(k+1)}$ 的作用,式(16)可扩展为:

$$\mathbf{X}^{(k+1)} \approx \mathbf{X}_f^{(k)} + \mathbf{B}_1 \mathbf{Z} + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{u}^{(k+1)} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{B}_2 = \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{u}} \bigg|_{\mathbf{X}_f^{(k)}}$ 为状态变量 $\mathbf{X}$ 对控制变量 $\mathbf{u}$ 的灵敏度。由式(18)可以推导得到 $\mathbf{X}^{(k+1)}$ 的 GMM 表达式 $g_2(\mathbf{x})$ 为:

$$g_2(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(\mathbf{x} | \mathbf{X}_f^{(k)} + \mathbf{B}_1 \boldsymbol{\mu}_m + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{u}^{(k+1)}, \mathbf{B}_1 \boldsymbol{\Sigma}_m \mathbf{B}_1^T) \quad (19)$$

通过不断地修正控制变量 $\mathbf{u}$ 可以改变各高斯项目的期望,最终使 $\mathbf{X}^{(k+1)}$ 的概率分布满足设定的置信水平。

3.2 机会约束规划问题的求解

由式(19)可知, $\mathbf{X}^{(k+1)}$ 的累积概率分布函数可以表示为:

$$G_2(\mathbf{x}) = \int_{-\infty}^{\mathbf{x}} g_2(t) dt = \sum_{m=1}^M \omega_m \Phi \left(\frac{\mathbf{x} - (\mathbf{E}_m^{(k)} + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{u}^{(k+1)})}{\sqrt{\mathbf{B}_1 \boldsymbol{\Sigma}_m \mathbf{B}_1^T}} \right) \quad (20)$$

式中: $\mathbf{E}_m^{(k)} = \mathbf{X}_f^{(k)} + \mathbf{B}_1 \boldsymbol{\mu}_m$; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布的累积 PDF。

下面以潮流约束方程式(13)为例对其转换过程加以说明,方程式(13)可以等效为以下2个方程:

$$\sum_{m=1}^M \omega_m \Phi \left(\frac{\bar{S}_{\text{line}} - (\mathbf{E}_m^{(k)} + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{u}^{(k+1)})}{\sqrt{\mathbf{B}_1 \boldsymbol{\Sigma}_m \mathbf{B}_1^T}} \right) \geq 1 - \frac{\alpha_{\text{line}}}{2} \quad (21)$$

$$\sum_{m=1}^M \omega_m \Phi \left(\frac{-\bar{S}_{\text{line}} - (\mathbf{E}_m^{(k)} + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{u}^{(k+1)})}{\sqrt{\mathbf{B}_1 \boldsymbol{\Sigma}_m \mathbf{B}_1^T}} \right) \leq \frac{\alpha_{\text{line}}}{2} \quad (22)$$

由于 $\Phi(\cdot)$ 为单调函数,且 $\omega_m > 0$, 故式(21)、(22)不等号左侧为单调函数,代入不同的 $\Delta \mathbf{u}^{(k+1)}$ 可以得到不同置信水平,通过二分法可以快速搜索出对应的分位点。

若已知 $\sum_{m=1}^M \omega_m \Phi \left(\frac{\bar{S}_{\text{line}} - \mathbf{E}_m^{(k)} - \boldsymbol{\gamma}_1}{\sqrt{\mathbf{B}_1 \boldsymbol{\Sigma}_m \mathbf{B}_1^T}} \right) = 1 - \frac{\alpha_{\text{line}}}{2}$ 、 $\sum_{m=1}^M \omega_m \times \Phi \left(\frac{-\bar{S}_{\text{line}} - \mathbf{E}_m^{(k)} - \boldsymbol{\gamma}_2}{\sqrt{\mathbf{B}_1 \boldsymbol{\Sigma}_m \mathbf{B}_1^T}} \right) = \frac{\alpha_{\text{line}}}{2}$, 其中 $\boldsymbol{\gamma}_1$ 、 $\boldsymbol{\gamma}_2$ 为达到线路传输容量的安全置信水平,则方程式(21)、(22)可转换为:

$$\boldsymbol{\gamma}_2 \leq \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{u}^{(k+1)} \leq \boldsymbol{\gamma}_1 \quad (23)$$

至此,关于线路潮流的概率不等式(13)被转化为关于 $\Delta \mathbf{u}^{(k+1)}$ 的确定性线性不等式。同样地,可以对静态安全约束方程式(11)、式(12)及式(14)进行类似处理,将其转化为线性不等式,使得式(6)–(14)所描述含不确定性变量的非线性 CCP 问题在第 k 步可近似转换为线性规划问题,具体如下:

$$\begin{cases} \min \Delta F = \mathbf{c}_u \Delta \mathbf{P}_{g,u}^{(k+1)} + \mathbf{c}_d \Delta \mathbf{P}_{g,d}^{(k+1)} + \mathbf{c}_l \Delta \boldsymbol{\rho}^{(k+1)} \mathbf{P}_{l,f} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{P}_{g,\min} \leq \mathbf{P}_g^{(k)} + \Delta \mathbf{P}_{g,u}^{(k+1)} - \Delta \mathbf{P}_{g,d}^{(k+1)} \leq \mathbf{P}_{g,\max} \\ \Delta \mathbf{P}_{g,u}^{(k+1)} \leq \mathbf{R}_{u,\max} \Delta t, \Delta \mathbf{P}_{g,d}^{(k+1)} \leq \mathbf{R}_{d,\max} \Delta t \\ \boldsymbol{\rho}^{(k)} + \Delta \boldsymbol{\rho}^{(k+1)} \leq \boldsymbol{\rho}_{\max} \\ \boldsymbol{\gamma}_2 \leq \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{u}^{(k+1)} \leq \boldsymbol{\gamma}_1 \end{cases} \end{cases} \quad (24)$$

式(11)、(12)、(14)转换得到的线性不等式

式中: ΔF 为迭代过程中相邻两步之间校正控制费用的增量; $\Delta \mathbf{P}_{g,u}^{(k+1)}$ 、 $\Delta \mathbf{P}_{g,d}^{(k+1)}$ 分别为相较于第 k 步,第 $k+1$ 步发电机上调功率和下调功率的增量; $\Delta \boldsymbol{\rho}^{(k+1)}$ 为第 $k+1$ 步减负荷率的增量。

通过求解问题式(24)可以求出当前的最佳修正量 $\Delta \mathbf{u}^{(k+1)}$, 并得到第 $k+1$ 步的控制变量 $\mathbf{u}^{(k+1)}$ 为:

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} + \lambda \Delta \mathbf{u}^{(k+1)} \quad (25)$$

式中: λ 为修正系数,一般可取 0.3 左右,这是由于灵敏度矩阵 $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 只在第 k 步运行点的邻域内具有较高精度,在迭代过程中,对 $\Delta \mathbf{u}$ 加以限制,可确保求解结果位于近似线性化模型式(24)的有效域内。

同理,由于线性规划问题式(24)的近似性,因此

所求得的 $u^{(k+1)}$ 一般并不是最优解,还需要在此基础上进行迭代计算,直至 $|\Delta u^{(k+1)}| \leq \varepsilon$ 为止,其中 ε 为预设阈值。

3.3 ALP 方法的改进

为了保证 ALP 的精度,每次迭代都需要重新计算潮流以及灵敏度矩阵 B_1 和 B_2 ,由于含 UPFC 系统潮流方程的非线性性质,一般难以获得灵敏度矩阵的解析表达式,因此只能通过数值方法求取 B_2 为:

$$B_2 = \frac{\partial X}{\partial u} \approx \frac{X(u + \Delta u) - X(u)}{\Delta u} \quad (26)$$

若系统的控制变量总数为 n_u ,则每次迭代需要进行 $n_u + 1$ 次潮流计算。对于大型电力系统,发电机、可调负荷及 UPFC 等控制元件数量众多,故迭代过程中灵敏度更新计算占用了大量时间。

为了减少计算量,需要设法减少参与校正控制的控制变量数目。考虑到扰动后一般只有少数变量严重违反静态安全约束,故可根据校正前系统状态,筛选出若干违约程度较为严重的主导观测变量,重点对其安全性加以校正。对于系统中每个控制变量 $u_i (i=1, 2, \dots, n_u)$,可定义平均灵敏度 ζ_i 为:

$$\zeta_i = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} \left| \frac{\Delta y_k}{\Delta u_i} \frac{u_{i,N}}{y_{k,N}} \right| \quad (27)$$

式中: y_k 为第 k 个主导观测变量; Δu_i 为控制变量 u_i 的增量; Δy_k 为第 k 个主导观测变量的增量; $u_{i,N}, y_{k,N}$ 分别为 u_i, y_k 的额定值; n_c 为主导观测变量的数目。对于发电机和负荷而言,其单位调节量的经济代价已知,此时可以定义计及经济代价的平均灵敏度 ζ'_i 为:

$$\zeta'_i = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} \left| \frac{1}{c_{u_i}} \frac{\Delta y_k}{\Delta u_i} \frac{u_{i,N}}{y_{k,N}} \right| \quad (28)$$

式中: c_{u_i} 为控制措施 u_i 的经济代价系数。基于 ζ'_i 进行控制变量筛选可以更好地反映其经济性能。根据 ζ_i 或 ζ'_i 的大小对控制变量进行排序,保留 ζ_i 或 ζ'_i 较大的若干个控制变量,在此基础上进行校正控制决策,这样可以有效地减小问题规模,提高计算效率。另外,由于不同控制变量的灵敏度计算互不相关,因此,还可以采取并行处理技术,这样大幅地提高了计算速度。

需要说明的是,尽管近似线性化模型存在截断误差,但由于每一步迭代时均会重新计算灵敏度,更新模型,因此模型误差只会影响下一次迭代的初值,而不会在迭代过程中传递。该方法的主要误差在于采用近似线性化模型求取节点电压、线路潮流等变量的概率分布特性时所产生的误差。但风电及负荷功率的超短期预测误差一般较小,基于近似线性化模型可较为精确地求取其概率分布特性,从而保证优化解的精度。

4 算例分析

为了验证基于 GMM 及 ALP 的校正控制方法的有效性,将其应用于修改后的 IEEE 10 机 39 节点系统进行校正控制决策计算,仿真平台为 Thinkpad i5 2.3 GHz,仿真软件应用 MATLAB 2016a,其中线性规划调用 $\text{linprog}(\cdot)$ 函数进行求解。

4.1 算例系统

修改后的 IEEE 10 机 39 节点系统结构如图 2 所示,其详细数据见文献[17],系统基准容量为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。为了研究风电不确定性对校正控制决策的影响,将节点 32、37 处的同步发电机替换为 2 座风电场 WT_1, WT_3 ,并在节点 17 加装了 1 座风电场 WT_2 , $\text{WT}_1 - \text{WT}_3$ 的有功功率预测值分别为 6.5、2、5.4 p.u.,风电及负荷功率预测误差分别服从 TLS 分布及高斯分布,相应参数及其 GMM 如附录 B 所示。同步发电机输出功率上、下限及功率调整代价因子见附录 C 表 C1,各负荷节点的可控比例及代价因子见附录 C 表 C2,各线路的传输极限见附录 C 表 C3。

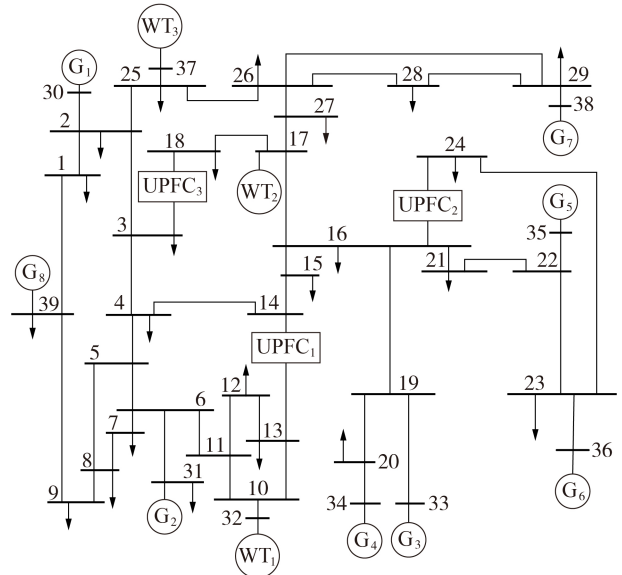


图2 修改后的 IEEE 10 机 39 节点系统结构

Fig.2 Structure of modified IEEE 10-machine 39-bus system

假设算例系统中节点 15 处的负荷增加 250 MW,应用计及相关性的拉丁超立方抽样方法[18]对风电及负荷功率预测误差进行抽样,生成 3 000 个样本,在此基础上对系统静态安全性进行考核。计算结果表明,扰动后系统静态频率偏低,且线路 13-14、15-16、21-22 将以较大概率出现过载。以线路 13-14 为例,扰动前、后线路传输容量的 PDF 如图 3 所示,图中线路传输容量为标么值,后同。

由图 3 可见:扰动前线路 13-14 输送功率的期望为 2.47 p.u.,线路过载的概率约为 1.73% (见图 3 中

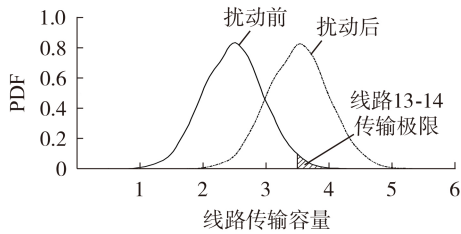


图3 扰动前、后线路13-14传输容量的PDF对比

Fig.3 Comparison of PDF for transmission capacity of Line 13-14 between before and after disturbance

阴影部分);扰动后该线路过载的概率大幅增加,约为52%。由此可见,扰动后系统的静态安全置信水平较低,需要采取校正控制措施。考虑到UPFC能够灵活地调节线路潮流,为了降低控制成本,提高控制能力,在线路13-14、21-24、3-18分别装设了3台UPFC,其参数相同,如附录C表C4所示。

4.2 校正控制策略分析

取静态安全约束置信水平 $1-\alpha_f$ 、 $1-\alpha_v$ 、 $1-\alpha_{line}$ 及 $1-\alpha_u$ 均为98%,阈值 $\varepsilon=0.003$,基于风电及负荷功率预测误差的GMM,应用ALP方法对扰动后的系统进行了校正控制决策。计算结果表明,节点9和节点25需要分别切除4.34、40.99 MW负荷,节点36发电机出力减少4.5 MW,校正控制前、后UPFC控制变量设定值见表1,校正控制总代价为\$338.1。表中, P_c 、 Q_c 、 V_1 、 V_{se} 、 V_{sh} 均为标么值。

表1 校正前、后UPFC控制变量设定值

Table 1 Setting values of UPFC control variables before and after correction

控制对象		P_c	Q_c	V_1	V_{se}	V_{sh}
校	UPFC ₁	3.0512	-0.0603	1.0120	0.0662	1.0411
正	UPFC ₂	-0.4076	-0.1459	1.0320	0.0395	1.0396
前	UPFC ₃	-0.4268	-0.9733	1.0380	0.0303	1.0413
校	UPFC ₁	3.2012	0.2910	0.9844	0.0685	0.9651
正	UPFC ₂	-0.9906	0.9688	0.9906	0.0867	0.8428
后	UPFC ₃	-0.9915	-0.9958	1.0498	0.0420	1.0810

为了验证上述校正控制方案的有效性,同样基于3000个样本场景,对校正控制后系统的静态安全性进行了统计分析。图4给出了校正控制前、后部分线路传输容量的PDF对比。由图可见:线路15-16、21-22传输容量上限分别为4.5、6.8 p.u.,校正前线路15-16发生过载现象的概率达到60.57%,而线路21-22的过载概率更是高达80.43%;经过校正控制后,线路15-16、21-22越限的概率分别降低至0.6%、1.03%,满足预设的置信水平要求。

校正控制前、后系统静态频率偏差 f_d 的PDF对比如图5所示,图中频率偏差为标么值。设定的频率偏差最大值为0.2 Hz,即0.004 p.u.。由图5可见:扰动前 f_d 的期望为-0.0003 p.u., f_d 处在安全区

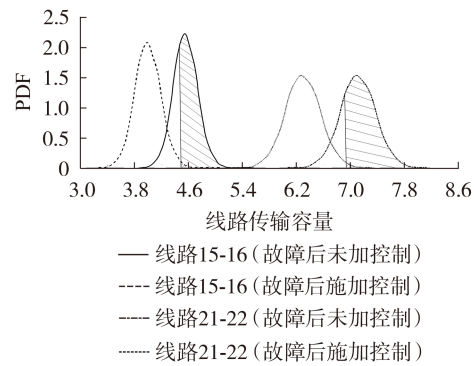


图4 校正控制前、后部分线路传输容量PDF对比

Fig.4 Comparisons of PDF for transmission capacity of partial lines between before and after corrective control

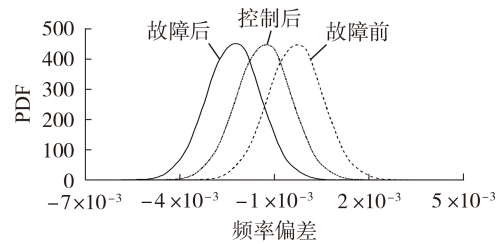


图5 校正控制前、后系统频率偏差PDF对比

Fig.5 Comparison of PDF for system frequency deviation before and after corrective control

间内;扰动后, f_d 的期望跌落到-0.0023 p.u.,其低于-0.004 p.u.的概率约为2.37%,不满足给定的置信水平要求。校正后由于切除了部分负荷, f_d 期望值增加到-0.0012 p.u.,其低于-0.004 p.u.的概率为0.133%,满足给定的置信水平要求。此外,分别设置信度为98%、95%及92%,对校正控制方案及其经济代价进行了计算,结果见附录D表D1。由表可见,控制代价将随着置信水平的提高而增加。

在校正控制决策过程中,算法迭代40次后收敛,控制变量最大修正量随迭代次数增加而变化的曲线如附录D图D1所示。若不采取任何改进措施,则整个决策过程计算耗时约1.5 h,这是由于本文算例中控制变量 u 包括21个切负荷量、8个发电机功率调整量以及3组UPFC控制变量,控制变量总数为38个,故为了更新灵敏度矩阵,每次迭代需要进行39次含UPFC系统的潮流计算。

为了提高计算效率,可根据3.3节所提方法对控制变量进行筛选。本文算例中,违约较为严重的主导观测变量为 S_{15-16} 、 S_{21-22} 、 S_{16-19} 、 S_{16-21} 及 f_d ,计算各控制变量对主导观测变量的平均灵敏度,其中 S_{15-16} 为线路15-16的传输容量, S_{21-22} 、 S_{16-19} 、 S_{16-21} 含义类似。对于UPFC,本文不计其控制代价,故采用平均灵敏度 ζ_i ,结果见附录E表E1。可以看到, V_1 的灵敏度远大于 P_c 、 Q_c 的灵敏度,故从3台UPFC的控制变量

u_{upfc} 中选择 UPFC₁—UPFC₃ 的并联变压器所连接的节点电压幅值 V_{11} — V_{13} 作为主导控制变量。对于发电机及负荷,其单位控制代价已知,故采用计及经济代价的平均灵敏度 ζ'_i ,结果见附录 E 表 E2,从中可筛选出平均灵敏度较大的 12 个变量作为主导控制变量。则待优化控制变量的总数由 38 个减少到 15 个,灵敏度更新时间可节省约 60%。由上文计算得到的校正控制策略可以看到,在未对控制变量进行筛选时,校正控制主要通过节点 9、节点 25 处的负荷以及节点 36 处的发电机实现,而这些均为附录 E 表 E2 中的主导控制变量,这也验证了上述控制变量筛选方法的有效性。在实际工程中,还可以采用并行计算来加快计算速度,最终可以使决策时间达到 2~3 min。

4.3 ALP 方法与场景法的对比

将基于 GMM 及 ALP 的校正控制决策方法与场景法进行对比,考虑到算例系统含有 24 个不确定变量(3 座风电场和 21 个负荷),可能出现的场景数量庞大,为了简化问题,假设所有负荷具有相同的预测误差。应用考虑相关性的拉丁超立方抽样方法生成 3 000 个场景,再应用同步回代法进行场景缩减^[19],生成的 12 个典型场景及其发生概率见附录 F 表 F1,在此基础上进行校正控制决策。

场景法包含的变量及约束方程数量众多,是一个大规模的非线性优化问题。为求解该问题,应用 GAMS24.7 软件进行编程,使用 IPOPT 求解器进行求解,求解器迭代 2 319 次后收敛,计算用时 2 793 s,控制方案代价为 \$ 393.9。为了验证所得校正控制方案的有效性,同样基于 3 000 个样本场景,对控制方案进行验算,结果表明采用场景法所得控制策略下系统静态安全的概率约为 95%。

基于 GMM 及 ALP 的校正控制方法与场景法的对比如表 2 所示。由表可见,基于 GMM 及 ALP 的决策方法计算速度较快,所得控制策略代价较低,且具有较好的安全性。需要指出的是,基于 GMM 及 ALP 的方法在每一步迭代时实质上是一个机会约束问题,在风电及负荷功率预测误差较小时,它具有较高的精度。而场景法的精度依赖于场景的代表性,一般而言,场景数量越多,其代表性越好,优化计算精度将越高,但计算用时也会急剧增加。因此,典型场景的选取对比较结果有着重要影响。

表 2 ALP 方法与场景法对比

Table 2 Comparisons between ALP method and scenario-based method

方法	控制代价 / \$	计算用时 / s	静态安全 置信水平 / %
场景法	393.9	2 793	95
ALP 方法	338.1	120~180	98

5 结论

本文提出了一种基于 GMM 及 ALP 的校正控制决策方法,主要成果如下:①采用 GMM 来描述风电及负荷功率预测误差的联合概率分布特征,较好地考虑了其相关性及其概率分布的不规则性;②应用灵敏度分析方法,并结合 GMM 的性质将非线性不确定系统的校正控制问题转化为线性规划问题,迭代求解,逐步收敛到最优解;③将该方法应用于修改后的 IEEE 10 机 39 系统的校正控制决策,并与场景法进行了对比,结果表明,该方法能在确保静态安全的同时,较好地降低控制代价,提高决策速度。

为了提高校正控制决策速度,本文提出了基于并行计算及控制变量筛选的方法,但这些措施在大规模电力系统中的有效性还有待进一步考核,这将是下一步研究的重点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则:GB 38755—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [2] 国家能源局. 我国风电并网装机突破 3 亿千瓦[EB/OL]. [2022-03-29]. http://www.nea.gov.cn/2021-11/30/c_1310343188.htm,2021-11-30/2022-5-9.
- [3] RABIEE A, SOROUDI A, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Corrective voltage control scheme considering demand response and stochastic wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2965-2973.
- [4] 马溪原. 含风电电力系统的场景分析方法及其在随机优化中的应用[D]. 武汉:武汉大学,2014.
MA Xiyuan. Scenario analysis and stochastic programming of wind-integrated power systems[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [5] ROALD L, MISRA S, KRAUSE T, et al. Corrective control to handle forecast uncertainty: a chance constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1626-1637.
- [6] 袁杨,张衡,程浩忠,等. 发输电系统鲁棒优化规划研究综述与展望[J]. 电力自动化设备,2022,42(1):10-19,85.
YUAN Yang, ZHANG Heng, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect of robust optimization and planning research on generation and transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 10-19, 85.
- [7] 张尚,顾雪平,王涛. 基于分布鲁棒优化的含风电系统静态安全校正控制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):58-64.
ZHANG Shang, GU Xueping, WANG Tao. Static security corrective control method of wind power-integrated system based on distributional robust optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 58-64.
- [8] 周海强,顾婷艳,薛峰,等. 基于连续近似线性规划的含 UPFC 风电系统校正控制决策方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(8):20-28.
ZHOU Haiqiang, GU Tingyan, XUE Feng, et al. Decision-making method of corrective control for wind power system with unified power flow controller based on successive approximated linear programming[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2022, 46(8): 20-28.
- [9] 李晓利, 高金峰. 用于配电网多目标无功优化的改进粒子群优化算法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 106-111.
LI Xiaoli, GAO Jinfeng. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 106-111.
- [10] 易明月, 童晓阳. 考虑风荷预测误差不确定性的动态经济调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4050-4057.
YI Mingyue, TONG Xiaoyang. Dynamic economic dispatch considering uncertainties of wind power and load forecast error[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4050-4057.
- [11] 杨文佳, 康重庆, 夏清, 等. 基于预测误差分布特性统计分析的概率性短期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 47-52.
YANG Wenjia, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Short term probabilistic load forecasting based on statistics of probability distribution of forecasting errors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 47-52.
- [12] 陈雁, 文劲宇, 程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 80-87.
CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow analysis considering dependencies among input random variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 80-87.
- [13] WANG Zhiwen, SHEN Chen, LIU Feng, et al. Analytical expressions for joint distributions in probabilistic load flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2473-2474.
- [14] SINGH R, PAL B C, JABR R A. Statistical representation of distribution system loads using Gaussian mixture model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 29-37.
- [15] 燕萍. 计及频率变化的电力系统仿真潮流程序[J]. 华东电力, 1994(7): 13-16.
- [16] 李虎成, 於益军, 李峰, 等. 含UPFC网络的潮流计算及稳态特性仿真分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(4): 1-6.
LI Hucheng, YU Yijun, LI Feng, et al. Power flow calculation and steady state simulation analysis of power systems with UPFCs[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(4): 1-6.
- [17] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1989: 223-227.
- [18] CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and Latin hypercube sampling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 294-301.
- [19] 赵书强, 要金铭, 李志伟. 基于改进K-means聚类 and SBR算法的风电场景缩减方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3947-3954.
ZHAO Shuqiang, YAO Jinming, LI Zhiwei. Wind power scenario reduction based on improved K-means clustering and SBR algorithm[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3947-3954.

作者简介:



周海强

周海强(1971—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: js.hq@163.com);

赵春祝(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化调度(E-mail: zczhaochunzhu@163.com);

顾婷艳(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为随机电力系统校正控制(E-mail: 1606749788@qq.com)。

(编辑 李玮)

Corrective control method of wind power system based on Gaussian mixture model and approximate linear programming

ZHOU Haiqiang¹, ZHAO Chunzhu¹, GU Tingyan¹, XUE Feng^{2,3}, GAO Chao¹, SONG Xiaofang^{2,3}

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: A corrective control method of wind power system based on Gaussian mixture model and approximate linear programming is proposed. Considering the non-Gaussian characteristics and correlations between wind power and load power prediction errors, the Gaussian mixture model is built to describe the joint probability distribution of wind power and load power. Then, considering the control measures such as load shedding, generator power adjustment and the unified power flow controller, the minimum control cost is taken as the objective function, and the mathematic model of the corrective control optimization problem with the static security constraints of voltage, frequency and line power flow is established for the wind power system. To solve the nonlinear optimization problem with uncertain variables, the nonlinear constraints are approximately transformed into linear constraints according to the properties of Gaussian mixture model in the neighborhood of steady-state operation points. And the problem is solved by linear programming method. Iterations are repeated until reaching a convergence. Finally, the method is applied in the modified IEEE 10-machine 39-bus system to validate its effectiveness. Results show that it has higher computation efficiency and better economic compared to the scenario-based method.

Key words: wind power; corrective control; Gaussian mixture model; sensitivity; linear programming; static security

附录 A 关于含 UPFC 系统潮流计算的说明

含 UPFC 输电线路的等值电路如图 A1 所示。图中：节点 l 为并联 VSC 联接节点； $\dot{I}_t$ 、 $\dot{I}_q$ 分别为并联 VSC 所抽取电流的有功和无功分量； $\dot{V}_{se}$ 为串联电源； r_{lm} 、 x_{lm} 、 b_{lm} 分别为线路的电阻、电抗和电纳。为简化分析，一般不计串联变压器等值电抗。

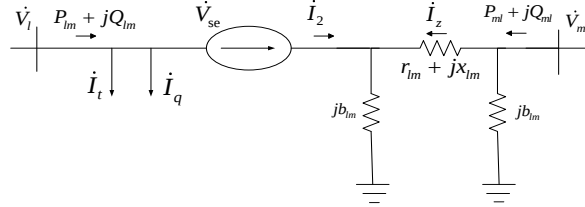


图 A1 含 UPFC 输电线路的等值电路

Fig.A1 Equivalent circuit of transmission line containing UPFC

UPFC 通过调节 $\dot{V}_{se}$ 、 $\dot{V}_{sh}$ 将 V_l 及 $P_{lm} + jQ_{lm}$ 控制为目标值。若 $P_{lm} + jQ_{lm}$ 设定值为 $P_c + jQ_c$ ，则推导可知：

$$P_{lm} = \left(\frac{P_c^2 + Q_c^2}{V_m^2} + b_{lm}^2 V_m^2 + 2b_{lm} Q_c \right) r_{lm} - P_c \quad (A1)$$

在计算含 UPFC 系统潮流时，由于节点 l 的电压幅值受 UPFC 控制而成为常数，将 l 节点视为受控的 PV 节点，其功率 P_{lm} 与 V_m 之间满足式 (A1)。经 UPFC 所在线路从节点 m 抽出的功率被 UPFC 控制为定值 P_c 和 Q_c ，故可将 m 节点视作 PQ 节点。这样，UPFC 连同其所在输电线路可以从系统中移去而代之以节点注入功率。计算潮流时只需对系统导纳矩阵作相应修改，将雅可比矩阵中元素 $\frac{\partial P_{lm}}{\partial V_m} V_m$ 修改为：

$$\frac{\partial P_{lm}}{\partial V_m} V_m = 2r_{lm} \left(b_{lm}^2 V_m^2 - \frac{P_c^2 + Q_c^2}{V_m^2} \right) \quad (A2)$$

即可实现系统潮流计算与 UPFC 的完全解耦。

为简明起见，以下将电力系统状态变量记为 $\mathbf{X}_{sys} = [\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}]$ ， $\mathbf{V}$ 、 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为节点电压及相角。系统控制参量可分为 $\mathbf{u}_{sys}$ 和 $\mathbf{u}_{upfc}$ 两类，其中 $\mathbf{u}_{sys} = [P_{g,u}, P_{g,d}, \rho]$ ， $P_{g,u}$ 、 $P_{g,d}$ 、 ρ 分别为发电机功率上调量、下调量及切负荷率； $\mathbf{u}_{upfc} = [P_c, Q_c, V_l]^T$ 为 UPFC 控制参量。由此，电力系统潮流方程可写成：

$$f(\mathbf{X}_{sys}, \mathbf{u}_{sys}, \mathbf{u}_{upfc}) = 0 \quad (A3)$$

式 (A3) 为系统有功和无功平衡方程，求解式 (A3) 可得交流系统的潮流，得出 $\dot{V}_l$ 、 $\dot{V}_m$ 及 $P_{lm} + jQ_{lm}$ 。在此基础上，由式 (A4) 和式 (A5) 可求出 UPFC 控制参数 $\dot{V}_{se}$ 及 $\dot{V}_{sh}$ ：

$$\dot{V}_m \left(\frac{\dot{V}_m - \dot{V}_l - \dot{V}_{se}}{r_{lm} + jx_{lm}} + jb_{lm} \dot{V}_m \right)^* = P_c + jQ_c \quad (A4)$$

$$\text{Re} \left\{ \dot{V}_{sh} \left(\frac{\dot{V}_l - \dot{V}_{sh}}{Z_{sh}} \right)^* \right\} = \text{Re} \left\{ \dot{V}_{se} \left(\frac{P_{lm} - jQ_{lm}}{\dot{V}_l^*} - \frac{\dot{V}_l - \dot{V}_{sh}}{Z_{sh}} \right)^* \right\} \quad (A5)$$

式中： Z_{sh} 为并联变压器等值阻抗。进一步可计算出串联和并联换流器容量。

$$S_{sh} = \left| \dot{V}_{sh} \left(\frac{\dot{V}_l - \dot{V}_{sh}}{Z_{sh}} \right)^* \right|, \quad S_{se} = \left| \dot{V}_{se} \left(\frac{P_{lm} - jQ_{lm}}{\dot{V}_l^*} - \frac{\dot{V}_l - \dot{V}_{sh}}{Z_{sh}} \right)^* \right| \quad (A6)$$

至此，可以完成含 UPFC 系统潮流计算，确定系统及 UPFC 稳态运行点。

附录 B 风电及负荷功率预测误差的 GMM

风电及负荷的预测误差组成随机向量 $\mathbf{X} = [\Delta \mathbf{P}_{w1}, \Delta \mathbf{P}_{w2}, \Delta \mathbf{P}_{w3}, \Delta \mathbf{P}_l]^T$ ，为了简化分析，本文假定所有负荷的预测误差相同。假设 $\Delta \mathbf{P}_{w1}$ 、 $\Delta \mathbf{P}_{w2}$ 、 $\Delta \mathbf{P}_{w3}$ 服从 TLS 分布，其位置参数 μ 、尺度参数 σ 及形状参数 ν 分别为： $[\mu_1, \sigma_1, \nu_1] = [0, 0.03, 5]$ ， $[\mu_2, \sigma_2, \nu_2] = [0, 0.035, 5]$ ， $[\mu_3, \sigma_3, \nu_3] = [0, 0.04, 5]$ 。 $\Delta \mathbf{P}_l$ 服从高斯分布 $N(0, 0.03^2)$ ， $\Delta \mathbf{P}_{w1}$ 、 $\Delta \mathbf{P}_{w2}$ 、 $\Delta \mathbf{P}_{w3}$ 及 $\Delta \mathbf{P}_l$ 的相关系数矩阵为：

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 0.6 & 0.2 \\ 0.8 & 1 & 0.3 & 0.2 \\ 0.6 & 0.3 & 1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 1 \end{bmatrix}$$

设风电及负荷功率预测误差的 GMM 为 $f_{\text{GMM}}(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\Sigma}_m)$ ，根据预测误差的性质，应用计及相关性的 LHS 方法生成 3000 个随机向量 $\mathbf{X}$ 的样本，在此基础上应用 EM 算法对模型参数进行估计。取 $M=4$ ，各高斯子项参数如下：

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0.5057, \quad \boldsymbol{\mu}_1 = \begin{bmatrix} -0.0003 \\ -0.0003 \\ 0.0005 \\ -0.0014 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_1 = \begin{bmatrix} 0.0006 & 0.0005 & 0.0006 & 0.0001 \\ 0.0005 & 0.0009 & 0.0003 & 0.0001 \\ 0.0006 & 0.0003 & 0.0019 & 0.0003 \\ 0.0001 & 0.0001 & 0.0003 & 0.0010 \end{bmatrix} \\ \omega_2 &= 0.1246, \quad \boldsymbol{\mu}_2 = \begin{bmatrix} -0.0013 \\ 0.0015 \\ -0.0001 \\ -0.0034 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_2 = \begin{bmatrix} 0.0019 & 0.0015 & 0.0031 & 0.0004 \\ 0.0015 & 0.0020 & 0.0016 & 0.0003 \\ 0.0031 & 0.0016 & 0.0087 & 0.0008 \\ 0.0004 & 0.0003 & 0.0008 & 0.0009 \end{bmatrix} \\ \omega_3 &= 0.0308, \quad \boldsymbol{\mu}_3 = \begin{bmatrix} 0.0023 \\ 0.0011 \\ -0.0040 \\ -0.0016 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_3 = \begin{bmatrix} 0.0103 & 0.0097 & 0.0055 & 0.0008 \\ 0.0097 & 0.0136 & 0.0041 & 0.0009 \\ 0.0055 & 0.0041 & 0.0061 & 0.0004 \\ 0.0008 & 0.0009 & 0.0004 & 0.0007 \end{bmatrix} \\ \omega_4 &= 0.3389, \quad \boldsymbol{\mu}_4 = \begin{bmatrix} 0.0007 \\ -0.0002 \\ -0.0003 \\ 0.0034 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_4 = \begin{bmatrix} 0.0019 & 0.0019 & 0.0010 & 0.0002 \\ 0.0019 & 0.0027 & 0.0007 & 0.0004 \\ 0.0010 & 0.0007 & 0.0013 & 0.0001 \\ 0.0002 & 0.0004 & 0.0001 & 0.0008 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

附录 C 发电机、负荷、线路及 UPFC 参数

表 C1 同步发电机功率极限及代价因子

Table C1 Power limits and cost coefficients of synchronous generators

发电机所在节点	30	31	33	34	35	36	38	39
$P_{g,max}/\text{p.u.}$	3.0	7.5	7.5	6.0	7.5	6.5	9.0	11.0
$P_{g,min}/\text{p.u.}$	1.34	3.25	3.05	1.86	3.15	2.25	3.5	5.75
$c_u/(\text{\$}\cdot\text{MW}^{-1})$	12.63	17.23	18.12	24.36	19.23	15.79	22.24	29.0
$c_d/(\text{\$}\cdot\text{MW}^{-1})$	10.36	15.23	16.12	21.36	17.23	12.79	19.24	27.0

表 C2 各负荷节点可控负荷比例及代价因子

Table C2 Controllable load proportion and cost coefficient of each node

负荷节点	1	3	4	7	8	9	12
$\bar{\rho}$	0.6	0.65	0.2	0.7	0.55	0.68	0.61
$c_l/(\text{\$}\cdot\text{MW}^{-1})$	9	10	6.3	7.5	8.5	7.9	8.8
负荷节点	15	16	18	20	21	23	24
$\bar{\rho}$	0	0.6	0.58	0.67	0.65	0.73	0.63
$c_l/(\text{\$}\cdot\text{MW}^{-1})$	6.6	7	6.5	9.2	8.2	7.5	9.8
负荷节点	25	26	27	28	29	31	39
$\bar{\rho}$	0.79	0.65	0.55	0.65	0.63	0.75	0.77
$c_l/(\text{\$}\cdot\text{MW}^{-1})$	6	6.6	7	6.5	5.9	10	7.5

表 C3 各线路传输极限

Table C3 Transmission capacity limits of each line

线路编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\bar{S}_{line}/\text{p.u.}$	3.0	2.0	5.0	4.0	4.7	3.0	1.7	4.0	4.2	7.0	5.0	6.5
线路编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\bar{S}_{line}/\text{p.u.}$	4.6	8.5	4.2	3.5	2.8	4.7	4.9	8.5	1.6	1.8	3.5	2.5
线路编号	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$\bar{S}_{line}/\text{p.u.}$	4.5	3.8	6.0	4.6	2.1	3.2	1.6	3.0	8.0	6.7	6.9	1.7
线路编号	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46		
$\bar{S}_{line}/\text{p.u.}$	8.6	4.9	7.4	2.5	7.3	4.2	2.8	3.5	5.2	11		

表 C4 UPFC 参数

Table C4 UPFC Parameters

$Z_E/\text{p.u.}$	$Z_B/\text{p.u.}$	$V_{se}/\text{p.u.}$	$\bar{V}_{se}/\text{p.u.}$	$V_{sh}/\text{p.u.}$	$\bar{V}_{sh}/\text{p.u.}$	$\bar{S}_{se}/\text{p.u.}$	$\bar{S}_{sh}/\text{p.u.}$
0.01+0.06j	0	0.0	0.4	0.8	1.3	2.5	2.5

注： Z_E 、 Z_B 分别并联与串联变压器阻抗； $\bar{V}_{se}$ 、 V_{se} 分别为 UPFC 串联电压的最大值和最小值； $\bar{V}_{sh}$ 、 V_{sh} 为并联电压的最大值和最小值； $\bar{S}_{se}$ 、 $\bar{S}_{sh}$ 分别为 UPFC 串联及并联换流器的最大容量。

附录 D 校正控制策略分析

表 D1 不同置信水平下校正控制方案

Table D1 Correction control strategies under different confidence levels

置信 水平/%	切负荷量/MW		发电机调整量/MW	控制 代价/\$
	节点 9	节点 25	节点 36	
92	4.30	24.87	4.11	235.91
95	4.31	32.22	4.30	282.56
98	4.34	40.99	4.50	338.10

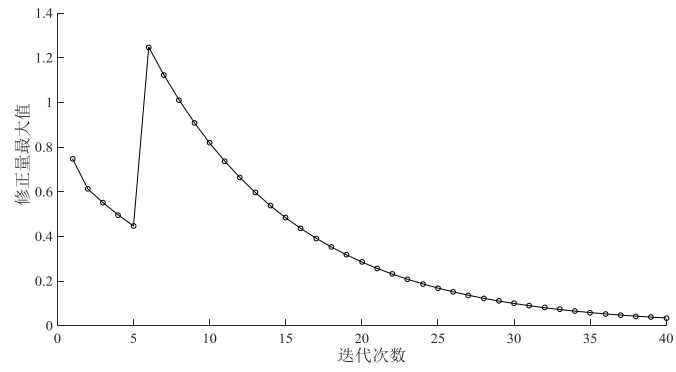


图 D1 最大修正量与迭代次数的关系

Fig.D1 Relationship between the maximum correction and the iteration numbers

附录 E 控制变量的平均灵敏度

表 E1 UPFC 的平均灵敏度
Table E1 Average sensitivity of UPFC

控制变量		P_c	Q_c	V_l
平均灵敏度 ζ_i	UPFC ₁	0.0139	0.0004	0.6417
	UPFC ₂	0.0090	0.0009	0.5103
	UPFC ₃	0.0315	0.0056	0.3447

注：按平均灵敏度 ζ_i 大小排序，粗体标出的灵敏度最大的 3 个控制变量作为 UPFC 主导控制变量。

表 E2 发电机及负荷的计及经济代价平均灵敏度
Table E2 Average sensitivity of generators and loads considering economics

负荷节点	1	3	4	7	8	9	12	15
计及经济代价 平均灵敏度 ζ'_i	0.0058	0.0053	0.0087	0.0070	0.0062	0.0116	0.0015	0.0184
负荷节点	16	18	20	21	23	24	25	26
计及经济代价 平均灵敏度 ζ'_i	0.0076	0.0078	0.0073	0.0092	0.0123	0.0096	0.0077	0.0063
负荷节点	27	28	29	31	39			
计及经济代价 平均灵敏度 ζ'_i	0.0064	0.0064	0.0071	0.0056	0.0073			
发电机所在节点	30	31	33	34	35	36	38	39
计及经济代价 平均灵敏度 ζ'_i	0.0053	0.0041	0.0046	0.0035	0.0057	0.0076	0.0023	0.0021

注：按计及经济代价的平均灵敏度 ζ'_i 大小排序，粗体标出的灵敏度最大的 12 个控制变量作为主导控制变量。

附录 F 典型场景及其概率

表 F1 典型场景及其概率
Table F1 Representative scenarios and their probabilities

场景编号	风电场 1 出力/%	风电场 2 出力/%	风电场 3 出力/%	负荷/%	概率
S1	101.17	104.44	98.98	105.89	0.0764
S2	93.88	92.60	94.83	95.16	0.0486
S3	99.46	97.25	100.69	95.24	0.0706
S4	91.36	92.46	90.67	99.14	0.0664
S5	96.76	99.77	86.98	97.09	0.0882
S6	97.26	96.66	101.52	103.86	0.0788
S7	99.47	95.43	107.15	100.45	0.0814
S8	99.75	97.69	99.35	97.01	0.0854
S9	102.42	103.40	100.89	98.11	0.0920
S10	105.28	103.76	110.72	100.65	0.1058
S11	100.04	102.64	95.66	97.53	0.1132
S12	106.70	110.74	102.20	102.46	0.0932

注：风电及负荷功率均以预测功率为基准。