

考虑风电相关性的电力系统随机无功备用优化

方斯頓¹,程浩忠¹,宋 越¹,曾平良²,姚良忠²

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:针对目前无功备用评估方式的缺陷和以风电为代表的新能源大量接入之后节点注入功率的不确定性,提出一种新的无功备用评估方法,并在此基础上建立考虑风电相关性的随机无功备用优化模型。首先使用均匀抽样法获得服从均匀分布的样本,然后使用基于奇异值分解的 Nataf 变换获得含相关性的风速样本,采用蒙特卡洛法将机会约束转化为确定型约束并采用混合蛙跳算法求解。数值计算的结果验证了所提无功备用评估方法的有效性,进一步分析表明风电会恶化系统的运行环境,增加状态变量越限的概率,而所提方法可以有效提高系统的电压水平和电压稳定裕度,降低系统的运行风险,并对 $N-1$ 严重故障也有一定的改善效果。

关键词: 风电; 相关性; 随机无功备用; 优化; 均匀抽样法; Nataf 变换; 混合蛙跳算法

中图分类号: TM 744; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.006

0 引言

实践表明,无功备用对维护电力系统稳定运行有着重要价值^[1-5]。对系统的无功备用水平进行分析进而提出优化方法是改善运行安全水平的有效手段。目前,稳态情况下的无功备用优化评估方法已有不少成果,主要可分为物理备用^[6-7]和有效备用^[8],两者的区别在于前者将发电机的物理无功上限与基态无功出力之差作为备用值,而后者则将无功备用定义为系统临界点处的无功出力与基态出力之差。研究表明,在系统临界点处大多数发电机的无功出力均没有越限^[9],采用物理备用会乐观地估计系统的无功水平,因此采用有效备用来衡量发电机的无功支撑能力更加准确。而由于发电机的安装位置不同,不同发电机的无功备用价值不尽相同,将每台发电机的无功备用简单相加并不能准确衡量系统的总无功备用。因此有必要将系统的总无功备用定义为各台发电机无功备用的加权和。文献[10]以发电机无功出力对潮流雅可比矩阵最小奇异值的灵敏度定义权系数,但当系统规模扩大时,发电机无功出力对最小灵敏度的影响很小,因此该方法不适合大系统分析。文献[7-8]采用节点无功参与因子定义无功备用权系数,但仅适用于鞍结分岔 SNB(Saddle Node Bifurcation)类型而不适合于极限诱导分岔 LIB(Limit Induced Bifurcation)类型。文献[11]指出极限曲面法向量能够指示 LIB 时节点电压的薄弱性,但由于极限曲面的

复杂性,法向量指标在某些区域可能变化较剧烈,不适合单独使用。

随着以风能为代表的新能源持续接入,节点注入功率的不确定性日益明显。目前在无功备用优化领域,考虑随机性的模型还未见报道。但众多研究表明,在含不确定性的系统中直接应用确定型模型的结果会增加系统的运行风险^[12]。此外,文献[13]指出考虑风电相关性会恶化系统运行环境。因此将风电的随机性和相关性纳入无功备用优化模型是值得尝试的研究思路。

针对以上问题,本文定义了一种基于节点参与因子和极限曲面法向量乘积的无功备用权系数,并在模型中考虑风电随机性与相关性,提出电力系统随机无功备用优化模型,采用混合蛙跳算法 SFLA(Shuffled Frog Leaping Algorithm)进行求解。对 9 节点系统和 IEEE 118 节点系统的仿真验证了本文方法的有效性。

1 模型的建立

1.1 发电机无功备用权系数

发电机无功备用权系数表征在系统不同位置的发电机对系统无功贡献的大小,贡献大的权系数也大,即在优化过程中价值较高,需要优先提高。针对目前权系数定义的缺陷,本文提出采用基于节点参与因子和极限曲面法向量指标乘积的权系数定义方式。

1.1.1 基于极限曲面法向量的节点电压薄弱性指标
在节点注入功率空间中,极限运行曲面 Σ 定义为:

$$\Sigma = \{(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) | f(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}) = 0, \mathbf{x} \in \Omega_{\text{SNB}} \cup \Omega_{\text{LIB}}\} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{P}, \mathbf{Q}$ 分别为有功、无功节点注入功率; $f(\cdot) = 0$ 为临界点处的潮流方程; $\Omega_{\text{SNB}}, \Omega_{\text{LIB}}$ 分别为 SNB 和 LIB

收稿日期:2014-12-30;修回日期:2015-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51337005);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB23903)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51337005) and the National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB23903)

电压稳定临界点集。根据文献[11], Σ 的法向量在张成空间 $\text{span}(\mathbf{Q})$ 上的投影 $\mathbf{n}_Q$ 可以表征节点电压的薄弱性, $\mathbf{n}_Q$ 越大, 代表该节点对无功的扰动越敏感, 越需要增加无功支撑。

1.1.2 基于节点参与因子的节点电压薄弱性指标

参与因子法是一种特征值分析法^[14], 设系统共有 n_b 个节点, 首先对潮流雅可比矩阵进行特征值分解, 得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{2(n_b-1)} \end{bmatrix} \mathbf{B}^T \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\Delta \mathbf{P}$ 、 $\Delta \mathbf{Q}$ 、 $\Delta \boldsymbol{\theta}$ 和 $\Delta \mathbf{U}$ 分别为节点注入有功、无功、节点电压相角和幅值的微分, 均为 n_b-1 维列向量; 矩阵 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}^T$ 分别为左、右特征向量对应的矩阵。

由式(2)易得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{U} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{2n_b-1} (\sigma_i^{-1} \mathbf{A}_i \mathbf{B}_i^T) \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{A}_i$ 和 $\mathbf{B}_i$ 分别为 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 的第 i 列。

令 $\Delta \mathbf{P} = \mathbf{0}$ 、 $\Delta \mathbf{Q} = \boldsymbol{\xi}_j$ (即第 j 个量为 1、其余为 0 的单位向量), 可得第 j 个节点电压灵敏度为:

$$\frac{\Delta U_j}{\Delta Q_j} = \sum_{i=1}^{2n_b-1} \frac{1}{\sigma_i} \mathbf{A}_{n_b+j-1,i} \mathbf{B}_{n_b+j-1,i} = \sum_{i=1}^{2n_b-1} \frac{1}{\sigma_i} p_{j,i} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{A}_{n_b+j-1,i}$ 、 $\mathbf{B}_{n_b+j-1,i}$ 分别为 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 中第 n_b+j-1 行、第 i 列的元素; $p_{j,i}$ 为状态 j 对模态 i 的参与因子。由式(4), 系统中对特征值最小的模态对系统的行为影响最大, 而参与因子较大的节点对 $\frac{\Delta U_j}{\Delta Q_j}$ 的贡献也大, 也即该节点越需要无功支撑。不失一般性, 下文的参与因子均针对主模态 (即最小特征值对应的模态), 将此模态下第 j 个节点的参与因子表示为 p_j 。

1.1.3 本文定义的无功备用权系数

在 $\mathbf{n}_Q$ 和 $p_{j,i}$ 的基础上, 本文定义的发电机无功备用权系数 $\mathbf{w}_G = \{w_{Gi} | i \in N_{\text{gen}}\}$, 其元素为:

$$w_{Gi} = \sum_{j \in N_Q} \frac{\partial U_j}{\partial U_{Gi}} \frac{\partial Q_{Gi}}{\partial Q_j} p_j n_{Qj} \quad (5)$$

其中, w_{Gi} 为发电机 i 的无功备用权系数; N_{gen} 为系统的发电机集; N_{PQ} 为系统的 PQ 节点集; $\frac{\partial U_j}{\partial U_{Gi}}$ 为节点 j 电压对发电机节点 i 端电压灵敏度, 其值越大代表发电机主动控制节点电压的能力越强, $\frac{\partial Q_{Gi}}{\partial Q_j}$ 为发电机节点 i 的无功出力对于节点 j 无功扰动的灵敏度, 其值越大代表发电机响应节点无功扰动的能力越强, 这 2 项衡量发电机对节点电压的控制能力和无功支撑能力; p_j 为节点 j 对主失稳模式的参与因子, n_{Qj} 为 $\mathbf{n}_Q$ 中节点 j 对应的元素, 如前文所述, 这 2 项衡量节点电压的薄弱性。

为避免数值差距影响指标准确性, 本文采用将

上述 4 项相乘的形式。这一指标综合表征了发电机对节点电压的控制能力及无功响应能力, 其值越大代表其对薄弱节点的无功支撑能力越强, 在无功备用优化中的价值越高。为便于分析比较, 下文将不包含 n_{Qj} 项的权系数称为基于参与因子的权系数, 而将不包含 p_j 项的权系数称为基于法向量的权系数。

1.2 随机无功备用优化模型

a. 目标函数如下:

$$\max E(Q_{\text{GR}}) = \max E[\mathbf{w}_G^T (\mathbf{Q}_{\text{Gc}} - \mathbf{Q}_{\text{G0}})] \quad (6)$$

其中, $E(\cdot)$ 表示求期望值; Q_{GR} 为本文定义的全系统总无功备用; $\mathbf{w}_G^T$ 为 1.1 节中定义的无功备用权系数; $\mathbf{Q}_{\text{Gc}} = [Q_{\text{Gc1}}, \dots, Q_{\text{Gci}}, \dots]^T$ 和 $\mathbf{Q}_{\text{G0}} = [Q_{\text{G01}}, \dots, Q_{\text{G0i}}, \dots]^T$ 分别为系统发电机在临界点和基态情况下的无功出力向量。

b. 变量约束为:

$$\text{s.t. } f(\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{P}_1, \mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_{\text{G0}}, \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

$$P_r(\mathbf{U} \geq \mathbf{U}_{\min}) \geq p_{U, \min}, \quad P_r(\mathbf{U} \leq \mathbf{U}_{\max}) \geq p_{U, \max} \quad (8)$$

$$P_r(\mathbf{Q}_{\text{G0}} \geq \mathbf{Q}_{\text{G, min}}) \geq p_{Q_{\text{G, min}}}, \quad P_r(\mathbf{Q}_{\text{G0}} \leq \mathbf{Q}_{\text{G, max}}) \geq p_{Q_{\text{G, max}}} \quad (9)$$

$$\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max} \quad (10)$$

其中 f 为潮流方程; $\mathbf{U}$ 和 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为节点电压幅值及其相角; $\mathbf{P}_1$ 和 $\mathbf{Q}_1$ 分别为节点的有功负荷以及无功负荷, 风电机的有功、无功出力也作为负的负荷计入这一部分; $\mathbf{Q}_{\text{G0}}$ 为发电机的基态无功出力; $\mathbf{u}$ 为控制变量, 包括发电机端电压、节点无功补偿量、可调变压器变比, 为简化计算, 本文控制变量均作连续化处理; 下标 $\max$ 和 $\min$ 分别表示上限和下限; $P_r(\cdot)$ 表示事件发生的概率; p 为给定的越限概率。

2 模型的求解

前文所述的模型是带机会约束的非线性规划问题, 本文采用随机潮流和混合蛙跳算法求解该问题。

2.1 基于均匀采样的随机潮流

均匀抽样法不同于普通的采样方法, 其以确定性方式在采样空间中生成服从均匀分布的序列, 可提高蒙特卡洛的精度^[15]。过程简述如下, 流程见图 1。

a. 产生非负整数向量 $\mathbf{H}_{1 \times m} = [h_1, h_2, \dots, h_m]$ 满足 $h_1 = 1, 1 < h_j < n$ (对 $\forall j \neq i, j \neq 1, h_j \neq h_i$)。

b. 获得 m 维独立满足多项式分布 $C(N, 1/N)$ 的向量 $\mathbf{B}_{1 \times m} = [b_1, b_2, \dots, b_m]$ 。

c. 利用简单随机采样获得在 $[-0.5, 0.5]$ 满足均匀分布的采样矩阵 $\mathbf{E}_{m \times N} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_m]^T$, 其中 $\mathbf{e}_k = [e_{k1}, e_{k2}, \dots, e_{kN}]$ ($k = 1, 2, \dots, m$)。

d. 采样矩阵 $\mathbf{Y}_{m \times N} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m]^T$ 可由式(11)生成, 其中 $\mathbf{y}_k = [y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kN}]$ ($k = 1, 2, \dots, m$)。

$$y_{ij} = \text{Mod} \left(\frac{j h_i + b_i - 0.5}{N} \right) + \frac{e_{ij}}{N} \quad (11)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N; \text{Mod}(\cdot)$ 表示取余运算。

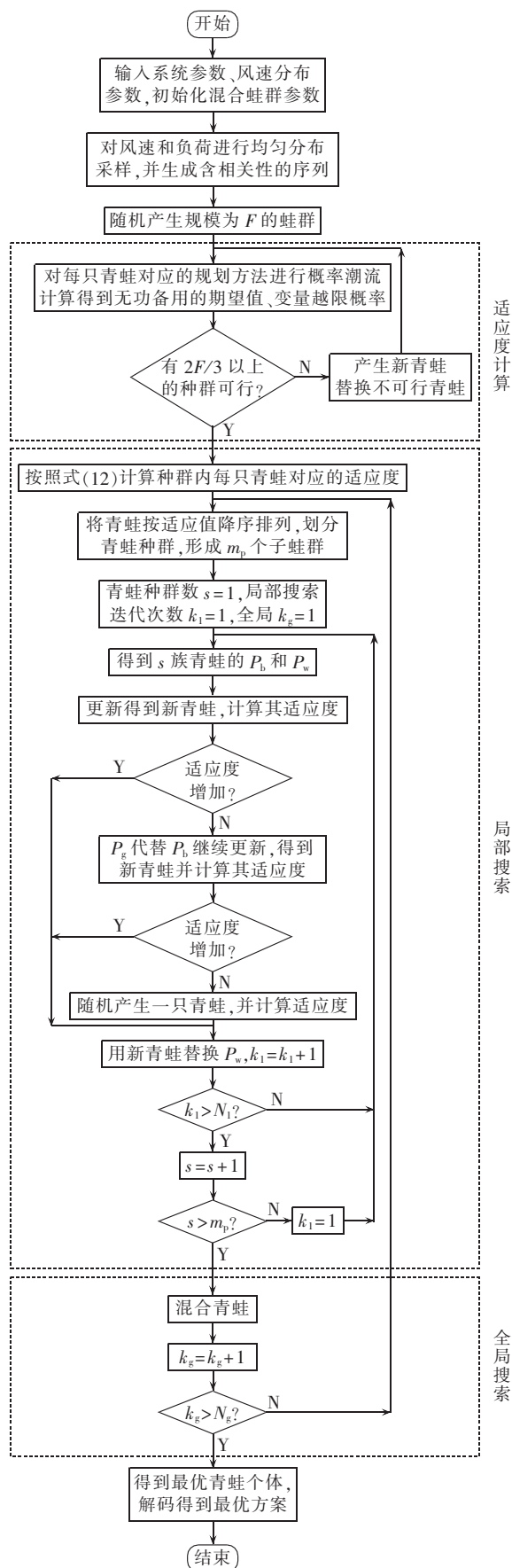


图 1 蛙跳算法求解无功备用优化流程
Fig.1 Flowchart of reactive power reserve optimization by SFLA

获得 $Y_{m \times N}$ 后, 可根据文献[16]中的方法首先获得含相关性的正态分布样本, 最后转化为所需的分布。最终采用蒙特卡洛获得输出变量的数字特征。

2.2 基于混合蛙跳的优化算法

混合蛙跳算法由 Eusuff 和 Lansey 在 2003 年提出^[17], 在求解大规模优化问题时具有收敛速度快、全局寻优能力强的优点, 在各学科中均得到应用^[18-19]。现将其简要介绍如下。

以系统某一无功出力方案作为一只青蛙 $X_f = [x_{f1}, x_{f2}, \dots, x_{fn}]$, 其中 n_c 为系统中控制变量个数, 控制变量包括静态电容器出力、发电机端电压、变压器分接头。

步骤 1: 设定初始参数。设定群体青蛙数量 F 、种群数 m_p 、局部搜索迭代次数 N_l 、全局迭代次数 N_g 、青蛙所允许单次最大移动距离 $S_{\max}$ 。

步骤 2: 随机产生 F 只青蛙作为初始蛙群 $P = \{X_1, X_2, \dots, X_F\}$, 第 f 只青蛙代表问题的一个解 $X_f = [x_{f1}, x_{f2}, \dots, x_{fn}]$ 。

步骤 3: 对每只青蛙对应的方案进行连续潮流计算, 获得 Q_{GC} ; 按风速分布产生含相关性的风速序列, 并对该方案进行随机潮流计算, 获得该方案对应系统的无功备用期望值及节点电压、支路潮流和发电机无功出力越限的概率。适应度按式(12)计算。

$$f_{\text{fitness}} = \begin{cases} f_{\text{obj}} - F_0 & \text{无约束违反} \\ \frac{f_{\text{obj}} - F_0}{a} & \text{违反节点电压机会约束} \\ \frac{f_{\text{obj}} - F_0}{b} & \text{违反发电机无功机会约束} \\ \frac{f_{\text{obj}} - F_0}{c} & \text{违反 2 个约束} \end{cases} \quad (12)$$

其中, F_0 为给定正数以保证足够的选择压力; a, b, c 均为大于 1 的常数, $a = b < c$ 。

步骤 4: 若违反约束的青蛙数大于等于 $F/3$, 返回步骤 2, 重新生成青蛙替换不可行的青蛙, 直到种群中 $2F/3$ 以上的青蛙是可行的。

步骤 5: 划分青蛙种群。对所有青蛙按适应度降序排列, 记适应度最好的青蛙为 P_g , 并将青蛙均分为 m_p 个子蛙群, 记每个蛙群数目为 q 。其中, 第 1 只青蛙放入种群 1, 第 m_p 只放入种群 m_p , 第 $m_p + 1$ 只放入种群 1, 依此类推。

步骤 6: 局部搜索。对于每个种群, 记适应度最好的青蛙为 P_b , 最差的为 P_w 。如式(13)、(14)对 P_w 逐位进行更新得到 P_w^* , 若优于 P_w , 则将其替换; 若未改进, 使用 P_g 替换 P_b , 重复这一过程直到 P_w^* 优于 P_w 或达到局部搜索次数上限 N_l ; 在更新过程中若有青蛙越限, 则将其放置于边界上继续进行更新。

$$S = \begin{cases} \min \{ \text{rand}(p_b - p_w), S_{\max} \} & p_b - p_w \geq 0 \\ \max \{ \text{rand}(p_b - p_w), -S_{\max} \} & p_b - p_w < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$p_w^*=p_w+S \tag{14}$$
其中, p_b 、 p_w 和 p_w^* 分别为 P_b 、 P_w 和 P_w^* 的某一位。

步骤 7:混合蛙群,重复步骤 5、6,直到达到全局迭代次数 N_g 。

3 算例分析

3.1 9 节点系统

为说明本文所提无功备用权系数的有效性,首先以 9 节点系统为例,详细数据参见 Matpower 4.1^[20]。系统接线图如图 2 所示,节点 1 为平衡节点,节点 2、3 为 PV 节点,其余为 PQ 节点。发电机基态情况与临界状态下系统潮流数据如表 1 所示,表中数据均为标么值。临界状态下节点 1 发生无功越限,电压稳定裕度为 1.305 5,电压失稳类型为 LIB。

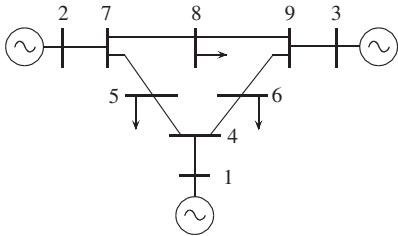


图 2 9 节点系统单线图
Fig.2 Single line diagram of 9-bus system

表 1 基态和临界潮流解
Table 1 Data for initial state and critical state

节点	发电机有功		发电机无功		无功 上限	端电压	
	基态	临界	基态	临界		基态	临界
1	0.72	1.30	0.240	3.00	3	1.0	1.0
2	1.63	3.37	0.145	2.66	3	1.0	1.0
3	0.85	3.21	-0.036	2.14	3	1.0	1.0

为比较本文定义的权系数、基于参与因子的权系数、基于法向量的权系数的效果,本文首先设计以下 3 种提高发电机无功备用的调度方案,各方案计算结果见表 2,表中 $\Delta\lambda/\lambda$ 表示电压稳定裕度增加百分比。

- a. 方案 A:发电机 1 无功上限提高 0.5 p.u.。
- b. 方案 B:发电机 2 无功上限提高 0.5 p.u.。
- c. 方案 C:发电机 3 无功上限提高 0.5 p.u.。

表 2 3 种指标与各方案下电压稳定裕度增量
Table 2 Augment of voltage stability margin by 3 methods for 3 schemes

节点	无功备用权系数			方案	$\Delta\lambda/\lambda$
	本文定义	基于参与因子	基于法向量		
1	0.6559	0.8368	0.9510	A	2.86%
2	0.1826	0.4101	0.5401	B	0
3	0.1083	0.1764	0.3504	C	0

从表 2 中数据可知,本文定义的权系数能够更准确地区分不同发电机的无功备用价值。为进一步说明,在方案 A 和方案 B 同时实施的基础上本文再设计 3 种调度方案,计算结果见表 3,表中数据均为标么值。此时无功备用权系数分别为 0.479 8、0.177 0、

0.075 4,调度前电压稳定裕度为 1.351 5,失稳类型为 SNB。

- a. 方案 D:节点 1 端电压调节至 1.05 p.u.。
- b. 方案 E:节点 2 端电压调节至 1.05 p.u.。
- c. 方案 F:节点 3 端电压调节至 1.05 p.u.。

表 3 各方案下发发电机无功备用变化情况
Table 3 Data of generator reactive power reserve for 3 schemes

参数	方案 D	方案 E	方案 F
节点 1	$\Delta Q_{G0,1}$	0.2190	-0.1410
	$\Delta Q_{Gc,1}$	0.2730	-0.2050
	$\Delta Q_{Gc,1} - \Delta Q_{G0,1}$	0.0540	-0.0640
节点 2	$\Delta Q_{G0,2}$	-0.1345	0.2340
	$\Delta Q_{Gc,2}$	-0.1412	0.2587
	$\Delta Q_{Gc,2} - \Delta Q_{G0,2}$	0.0070	0.0240
节点 3	$\Delta Q_{G0,3}$	-0.1317	-0.1610
	$\Delta Q_{Gc,3}$	-0.0840	0.1310
	$\Delta Q_{Gc,3} - \Delta Q_{G0,3}$	0.0477	0.2920
本文定义	0.0307	-0.0004	0.0294
ΔQ_{GR} 基于参与因子	0.0959	0.0146	0.0469
基于法向量	0.0644	0.0546	0.0703
$\sum_{i=1}^3 (\Delta Q_{Gc,i} - \Delta Q_{G0,i})$	0.1087	0.2520	0.1411
$\Delta\lambda$	0.0781	0	0.0702

对比 3 种方案下的 $\sum_{i=1}^3 (\Delta Q_{Gc,i} - \Delta Q_{G0,i})$ 与 $\Delta\lambda$ 可知,各发电机无功备用的简单相加与电压稳定裕度增加没有明显的关系,必须定义合适的权重才能有效衡量系统的无功水平。而对比 3 种定义方式下 ΔQ_{GR} 与 $\Delta\lambda$,可得本文的定义方法可较准确地衡量系统的无功备用水平,与电压稳定裕度增量吻合较好,明显优于另 2 种定义方式。而方案 D、F 均使得无功备用权系数最大的发电机 1 的无功备用提高,电压稳定裕度也明显提高,总体无功备用增加相当使得 2 种方案裕度增量相近;方案 E 中发电机 1 的无功下降,即使发电机 3 的无功备用提高较多,系统的电压稳定裕度却没有变化,这进一步证明本文无功备用定义的有效性。

3.2 IEEE 118 节点系统

3.2.1 算例设置

为说明本文所提随机无功备用优化方法的有效性,以 Matpower 4.1^[20]中的 IEEE 118 节点系统为例对优化算法进行分析,该系统共有 54 个发电机节点、9 台变压器和 17 个电容补偿节点,补偿容量上限均为 100 Mvar。节点电压上限均设为 1.06 p.u.,下限为 0.96 p.u.,置信概率均设为 98%。在节点 50、51、57、58、93、94、95、96 这 8 个节点装设 200 MW 的风电场,其中 50、51、57、58 为同一区域,93、94、95、96 为另一区域,区域内风电相关性系数为 0.8,区域间无相关性,风速均满足威布尔分布 $W(10.7,3.97)$ 。系统的负荷分为 3 个区域:

- a. 区域 A: 节点 24、33—73、116。
b. 区域 B: 节点 74—112、118。
c. 区域 C: 节点 1—23、25—32、113—115、117。

区域内的负荷相关系数均为 0.5, 不同区域内负荷相关系数为 0。设负荷均满足正态分布, 期望值等于负荷初始值, 标准差为其期望值的 5%。

算法参数设置为: 青蛙数量 F 为 200, 局部搜索次数 N_l 为 10, 全局搜索次数 N_g 为 200, 青蛙单次最大移动距离 $S_{\max}$ 为 5, $a=b=2, c=3$, 子蛙群数目 m_p 为 10。均匀采样规模为 500, 待采样随机变量数为 107 (99 个负荷+8 个风电场)。

3.2.2 本文方法优化结果分析

优化前节点电压 2% 分位数和 98% 分位数如图 3 所示, 图中节点电压为标么值, 后同。

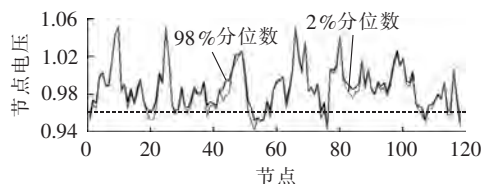


图 3 优化前节点电压分位数曲线
Fig.3 Quantile curves of node voltage before optimization

从图 3 中可以看出, 考虑风电随机性之后, 优化前运行点违反机会约束 14 个, 运行的风险大。优化后结果如图 4 所示, 优化后节点电压的方差显著减小, 机会约束均得到有效满足, 系统的运行风险降低。为进一步说明本文方法相对确定型无功备用优化的优势, 优化前后节点 114 电压的概率分布曲线如图 5 所示。

由图 5 可见, 优化前节点 114 电压的期望值为 0.9604 p.u., 满足节点电压约束下限, 但考虑风电随机性后该节点电压越下限概率达到 37%。因此忽略

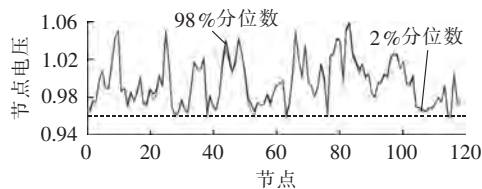


图 4 优化后节点电压分位数曲线
Fig.4 Quantile curves of node voltage after optimization

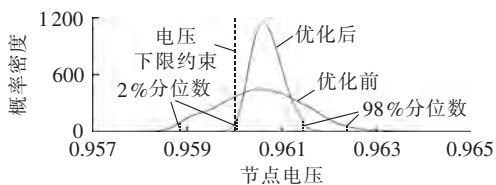


图 5 优化前后节点 114 电压概率分布

Fig.5 Voltage probability distribution of node 114 before and after optimization

风电随机性会增加系统运行的风险。而采用本文方法使得节点 114 电压的方差减小, 概率分布很好地满足了机会约束。

在严重故障方面, 经过 $N-1$ 故障筛选, 支路 8-5 开断是严重故障, 电压稳定裕度仅 0.67, 远远低于基态情况。而本文方法得到方案在支路 8-5 开断后的负荷裕度由 2821.79 MW 上升到 3651.86 MW。优化前、后系统节点电压 2% 分位数如图 6 所示。

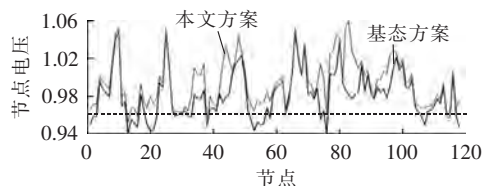


图 6 支路 8-5 开断时本文方案与基态电压 2% 分位数曲线

Fig.6 2% quantile curve of node voltage for proposed and original methods when branch 8-5 is open

由图 6 可见, 本文方法可以显著改善支路 8-5 切除后系统的电压水平, 仅有个别节点电压违反机会约束。这说明本文方法不仅可以改善正常运行情况下的电压水平, 降低系统运行风险, 对故障情况下的电压水平和稳定裕度也有提高作用。

3.2.3 3 种无功备用定义方式对比分析

为分析 3 种无功备用定义方式的有效性, 3 种无功备用定义方式下系统最薄弱节点 95 优化前、后的 PV 曲线如图 7 所示, 图中 λ 为负荷增长因子。本文定义方式下电压稳定裕度由 7989.37 MW 上升到 8657.78 MW, 增加 8.37%, 远高于基于参与因子的 1.06% 和基于法向量的 3.19%。这再次证明本文的无功备用定义方式可有效区分不同发电机的无功价值。

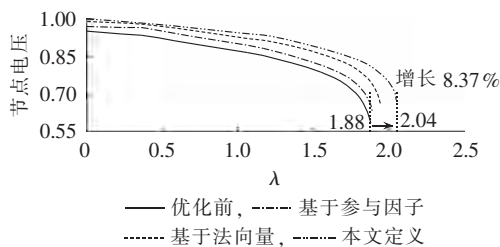


图 7 优化前后节点 95 PV 曲线

Fig.7 PV curve of node 95 before and after optimization

3.2.4 算法效率分析

为衡量算法寻优的效率及鲁棒性, 在相同种群规模下, 分别采用粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法、遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 和混合蛙跳算法求解 1.2 节中模型 100 次, 所得平均无功备用 $\bar{Q}_{GR}$ 、最大无功备用 $Q_{GR\max}$ 、最小无功备用 $Q_{GR\min}$ 、达到 $Q_{GR\max}$ 次数 N_0 、平均迭代次数 N_2 、平均计算时间

$\bar{t}$ 列于表 4 中。

表 4 各算法收敛特性
Table 4 Convergence characteristics
for different algorithms

算法	$\bar{Q}_{GR}$	Q_{GRmax}	Q_{GRmin}	N_Q	N_2	$\bar{t}/s$
SFLA1	205.71	206.33	201.63	44	110	1 025
SFLA2	200.64	206.12	195.64	25	142	1 041
PSO	200.34	206.33	193.75	24	146	1 052
GA	196.27	205.97	190.62	11	172	1 301

为分析种群混合策略对混合蛙跳算法寻优的影响,表中 SFLA1 代表包含种群混合策略的混合蛙跳算法,而 SFLA2 不包括种群混合,种群数 $m_p=1$ 。遗传算法参数:迭代次数 200,染色体数 100,交叉率 0.8,变异率 0.1,采用轮盘赌选择机制。粒子群优化算法参数为:迭代次数 200,粒子数 100,惯性权重 0.8,局部与全局学习因子 2,粒子最大移动距离 5。计算仿真平台基于 MATLAB2013a,Intel Core dual i7-3820 3.6 GHz, RAM 8 GB。

从表中可看出,4 种算法所得结果相近,但 SFLA1 达到 Q_{GRmax} 次数 N_Q 明显高于其他 3 种算法,平均迭代次数 N_2 则低于其他算法,这证明本文采用的混合蛙跳算法具有较高的寻优效率。而 SFLA2 与粒子群优化算法所得结果相近,说明 SFLA1 能够高效寻优的原因在于其不仅采用类似粒子群的局部搜索策略,还通过混合不同种群个体,极大增加了全局寻优能力。此外,由于引入种群混合策略,SFLA1 单次迭代的时间高于其他 3 种方法,但由于平均迭代次数 N_2 小,最终计算时间仍然优于其他 3 种方法。

4 结论

本文提出了一种考虑风电相关性的电力系统随机无功备用优化方法,并定义了新的发电机无功备用权重因子。9 节点算例的分析证明了本文无功备用定义的有效性,IEEE 118 节点系统的仿真结果表明本文的优化算法有效,优化方案显著提高了系统的电压稳定裕度与电压水平,并降低了系统的运行风险。得到结论如下:

- a. 本文方法能够在 SNB 和 LIB 这 2 种情况下准确识别出系统中的关键发电机,识别效果优于基于参与因子的定义方式和基于法向量的定义方式,基于本文定义的王功备用优化模型能够有效提高系统的电压稳定裕度;
- b. 系统不同发电机的无功备用价值随安装位置不同变化很大,合理增大关键发电机的无功备用可以快速有效提高系统的电压稳定性裕度;
- c. 考虑风电相关性会使部分状态变量违反机会约束,增大系统的运行风险;
- d. 本文方法可以有效提高系统电压稳定裕度,

改善系统的无功电压水平,减小由风电接入带来的电压波动,降低系统的运行风险,对改善严重故障下系统的电压稳定裕度有一定作用;

e. 本文采用的混合蛙跳算法采用种群混合机制,寻优效率高,高于同样本规模的粒子群优化算法和遗传算法。

为简化计算,本文对电容补偿量、变压器分接头等离散变量均进行了连续化处理。此外在考虑负荷增长的场景时仅考虑等比例增长。以上问题尚有待进一步研究。

参考文献:

[1] MANANDUR K R C, CHENOWETH R D. Optimal control of reactive power flow for improvements in voltage profiles and real power loss minimization[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and systems, 1981, 100(7): 3185-3194.

[2] FANG Sidun, CHENG Haozhong, SONG Yue. Stochastic optimal reactive power dispatch method based on point estimation considering load margin[C]//Proceedings of 2014 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Washington DC, USA: IEEE, 2014: 2231-2236.

[3] 罗毅, 多靖赞. 基于量子免疫克隆算法的多目标无功优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 31-35.

LUO Yi, DUO Jingyun. Multi-objective reactive power optimization based on quantum immune colonial algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 31-35.

[4] 孙伟伟, 付蓉, 陈永华. 计及无功裕度的双馈风电场无功电压协调控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 81-85.

SUN Weiwei, FU Rong, CHEN Yonghua. Coordinated var and voltage control of doubly-fed wind farm considering reactive power margin[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 81-85.

[5] 段建东, 杨杉. 基于改进差分进化法的含双馈型风电场的配电网无功优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 123-127.

DUAN Jiandong, YANG Shan. Reactive power optimization based on modified differential evolution algorithm for power distribution system with DFIG wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 123-127.

[6] ARYA L D, SINGH P, TITARE L S. Anticipatory reactive power reserve maximization using differential evolution[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 35(1): 66-73.

[7] MENEZES T V, da SILVA L C P, da COSTA V F. Dynamic VAR sources scheduling for improving voltage stability margin [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 969-971.

[8] RUIZ P A, SAUER P W. Reactive power reserve issues[C]//38th North American Power Symposium. Carbondale, USA: IEEE, 2006: 439-445.

[9] LEONARDI B, AJJARAPU V. Investigation of various Generator Reactive Power Reserve (GRPR) definitions for online voltage stability/security assessment [C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-7.

[10] 熊虎岗, 程浩忠, 徐敬友. 考虑提高系统无功备用容量的无功优化调度[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 36-40.

- XIONG Hugang, CHENG Haozhong, XU Jingyou. Optimal dispatch of reactive power considering increase of system reactive power reserve[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 36-40.
- [11] KATAOKA Y, SHINODA Y. Voltage stability limit of electric power systems with generator reactive power constraints considered[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 951-962.
- [12] HU Zechun, WANG Xifan, TAYLOR G. Stochastic optimal reactive power dispatch: formulation and solution method[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32: 615-621.
- [13] 余昆, 曹一家, 陈星莺. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 20-26.
- YU Kun, CAO Yijia, CHEN Xingying. Dynamic probability power flow of district grid containing distributed generation[J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(1): 20-26.
- [14] VERGHESE G C, PEREZ-ARRIAGA I J, SCHWEPPE F C. Selective modal analysis with applications to electric power systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(9): 3117-3125.
- [15] ZHANG R, WANG Z. Uniform design sampling and its fine properties[J]. Chin J Appl Probab Stat, 1996, 12(4): 37-47.
- [16] CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and Latin hypercube sampling[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 294-302.
- [17] EUSUFF M M, LANSEY K E. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm[J]. Water Resources Planning and Management, 2003, 129(3): 210-225.
- [18] EBRAHIMI J, HOSSEINIAN S H, GHAREHPETIAN G B. Unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(2): 573-581.
- [19] 陈功贵, 李智欢, 陈金富. 含风电场电力系统动态优化潮流的蛙跳算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 25-30.
- CHEN Gonggui, LI Zhihuan, CHEN Jinfu. SFL algorithm based dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 25-30.
- [20] PSERC. Power system engineering research. Matpower 4.1 [EB/OL]. (2011-11-04). <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>.

作者简介:



方斯顿

方斯顿(1991—),男,重庆人,博士研究生,主要从事电力系统安全稳定运行方面的研究工作(E-mail: fangston@sjtu.edu.cn);

程浩忠(1962—),男,浙江东阳人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划、安全经济运行、电压稳定、电力市场、电能质量;

宋越(1989—),男,上海人,硕士研究生,主要从事电力系统安全稳定运行方面的研究工作。

Stochastic reactive power reserve optimization considering wind power correlation

FANG Sidun¹, CHENG Haozhong¹, SONG Yue¹, ZENG Pingliang², YAO Liangzhong²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of present reactive power reserve assessment and the uncertainty of node injection power due to the large-scale integration of renewable energies, represented by wind power, a method is proposed for the reactive power reserve assessment, based on which, a stochastic reactive power reserve optimization model considering the wind power correlation is built. The uniform sampling method is used to obtain the samples with uniform distribution, the Nataf transformation based on singular value decomposition is adopted to obtain the wind speed samples with correlation, the Monte Carlo method is applied to convert the chance constraints into the definitive constraints, and the SFLA (Shuffled Frog Leaping Algorithm) is adopted to obtain the solution. The results of numerical calculation show the effectiveness of the proposed method, and the further analysis shows that, the wind power may deteriorate the operational environment of system and increase the limit violation probability of state variable, while the proposed method can effectively improve the voltage level and voltage stability margin of system, decrease its operational risk and mitigate the $N-1$ serious fault in a certain degree.

Key words: wind power; correlation; stochastic reactive power reserve; optimization; uniform sampling method; Nataf transformation; shuffled frog leaping algorithm