

基于 Benders 分解的发电机无功备用优化方法

孙全才^{1,2}, 程浩忠¹, 宋 越³

(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. 广西电网有限责任公司南宁供电局, 广西 南宁 530022;

3. 香港大学 电机电子工程系, 香港 999077)

摘要:电压稳定裕度与系统无功备用密切相关,因此,提出一种无功源的无功备用优化方法。引入发电机参与因子来衡量发电机无功备用的重要程度,建立以系统无功备用最大化为目标的优化模型,并应用 Benders 分解将模型分解为发电机主问题和电容器子问题。IEEE 39 节点系统算例验证了所提优化方法的有效性,优化方案大幅提高了系统电压稳定裕度。

关键词:Benders 分解;发电机无功备用;发电机参与因子;电压稳定;优化

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.004

0 引言

随着用电需求的不断增长,电力系统的电压崩溃风险已在世界范围内逐渐增大。导致电压崩溃的主要原因可以概括为^[1]:首先由于电力系统中的故障引起了发输电设备的断开;然后系统电压随之降低,负荷的功率恢复特性开始起作用;最后发电机受到绕组电流和系统运行条件的约束,其无功支撑能力无法维持系统电压稳定。因此,系统发生电压崩溃通常具有无功支撑不足的特点,这主要是由于系统对无功功率的发出和传输能力的限制^[2-3]。

在系统遭受扰动时,无功备用具有维持系统电压水平的作用。通常电压稳定性都与系统无功备用有关^[4]。因此,为了避免系统出现电压崩溃或电压跌落,保留充足的无功备用就非常必要。而系统运行人员常通过一些代表性的发电机来粗略估计系统电压稳定水平。要相对精确地评估电压稳定裕度就需要一种更加准确的衡量系统无功备用的计算方法。文献[5]对目前发电机无功备用的定义进行了总结,主要可以分为物理无功备用^[6-7]和有效无功备用^[8-9]两大类,一般物理无功备用计算简便但精度较低,而有效无功备用则更加精确但计算耗时。然而关键问题是如何从电压稳定性的角度观测系统无功备用的大小。对系统无功备用的计算通常有2种方法:一种是将系统中所有发电机的有效无功备用求和得到系统无功备用^[10];另一种则是对系统中所有发电机的物理无功备用加权求和得到系统无功备用^[11-12]。针对第2种方法,研究人员提出了不同方法来得到权重因子。文献[13]提出了通过等效同步调相机的方法来评估各发电机的无功支撑能力,但这种方法可能会出现潮流分岔、过电压和灵敏度异常问题。文献[14]以发电机无功对系统无功需

求的灵敏度作为权重因子,该方法不适用于负荷增长方式不确定的情况。文献[15]研究发电机无功备用与电压稳定裕度之间的高阶拟合关系,并依此得到发电机无功备用的权重系数,但这种方法需要大量的场景数据。研究人员已提出了多种无功备用的优化模型^[16],但模型的精确性和适用性仍有待于进一步提高,特别是很少有关于综合考虑发电机有效无功备用和权重因子的系统无功备用计算方法及优化模型的研究,文献[17]虽然提出了一种考虑发电机无功权重的有效无功备用定义,但其权重系数的计算方法不够直观,且缺乏数学依据。

本文提出一种发电机无功备用的评估方法和系统无功备用的定义。系统无功备用的计算采用将发电机参与因子与发电机有效无功备用相结合的方法。构建协调调度发电机和电容器2种无功设备的优化模型以达到提高系统电压稳定裕度的目的。为更好地求解该优化模型,利用 Benders 分解将其分解为发电机和电容器2个优化子问题。所提无功备用定义能更全面地评估系统无功备用水平,优化模型的求解方法可有效地解决发电机与电容器的配合调度问题。最后将所提方法在 IEEE 39 节点系统中进行测试,优化结果表明了该方法的合理性和有效性。

1 基于发电机参与因子的无功备用定义

本文提出了一种基于发电机参与因子的系统无功备用的定义,从提高系统电压稳定裕度的角度,来更加合理地评估系统无功备用水平。

1.1 发电机无功备用

为了充分考虑系统网络结构、运行方式以及负荷增长方式等因素的影响,本文对发电机无功备用采用一种有效无功备用的计算方法:

$$Q_{GR}^i = Q_{G,cr}^i - Q_G^i \quad (1)$$

其中, Q_{GR}^i 为发电机 i 的无功备用; $Q_{\text{G,cr}}^i$ 为发电机 i 在电压稳定临界点发出的无功功率, 其值可以通过连续潮流法计算得到; Q_{G}^i 为发电机 i 在当前运行点发出的无功功率。图 1 是一条典型的 PV 曲线, 有效无功备用是指发电机在图中 c 点 (电压稳定临界点) 发出的无功功率减去 a 点处无功功率。

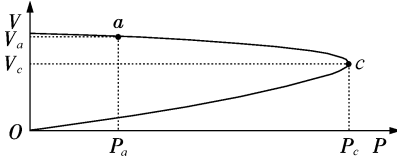


图 1 PV 曲线示意图

Fig.1 Schematic diagram of PV curve

由于各发电机无功输出能力都会受系统参数和运行条件的约束, 从而导致在系统发生电压崩溃时仍然有些发电机存在剩余无功, 然而这些剩余无功系统已经无法再调用。因此, 上述发电机有效无功备用定义更加精确地给出了发电机实际能够对系统电压稳定裕度起作用的那部分无功储备。

1.2 发电机无功支撑能力的评估

系统中每一台发电机的无功支撑能力会由于在网络中所处的位置和系统运行状态的不同而各不相同, 而要衡量系统的无功备用水平, 首先就必须有效评估发电机无功对系统电压稳定的重要程度。本文引入了发电机参与因子^[18]来指示发电机对系统电压稳定的无功支撑能力。

将系统完整潮流方程变量分解为发电机节点和负荷节点, 如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} P_G & P_L & Q_L & Q_G \end{pmatrix}^T = f(\theta_G, \theta_L, V_L, V_G) \quad (2)$$

其中, P 和 Q 分别为有功和无功功率; V 和 θ 分别为节点电压幅值和相角; f 为节点注入功率; 下标 G 和 L 分别表示发电机节点和负荷节点, 这样发电机无功就被包含在方程之中。再对式(2)进行线性化可得:

$$\begin{pmatrix} \Delta P_G \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta Q_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{P_G \theta_G} & J_{P_G \theta_L} & J_{P_G V_L} & J_{P_G V_G} \\ J_{P_L \theta_G} & J_{P_L \theta_L} & J_{P_L V_L} & J_{P_L V_G} \\ J_{Q_L \theta_G} & J_{Q_L \theta_L} & J_{Q_L V_L} & J_{Q_L V_G} \\ J_{Q_G \theta_G} & J_{Q_G \theta_L} & J_{Q_G V_L} & J_{Q_G V_G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_G \\ \Delta \theta_L \\ \Delta V_L \\ \Delta V_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J & J_{P_G V_G} \\ J_{P_L V_G} & J_{Q_G V_G} \\ J_{Q_L V_G} & J_{Q_G V_G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_G \\ \Delta \theta_L \\ \Delta V_L \\ \Delta V_G \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, J 为传统潮流的雅可比矩阵。发电机节点作为 PV 节点处理。从式(3)可看出, 传统的模态分析所做假设不仅包含 $\Delta P_G = \Delta P_L = 0$, 还包含 $\Delta V_G =$

0。然而发电机机端电压也是可以变化的, 所以在线性化方程中也应包含其变化部分对应的影响。另外也没有充分的理由去忽略发电机无功功率方程。

为关注发电机无功功率的影响, 可假设 $\Delta P_G = \Delta P_L = \Delta Q_L = 0$, 将式(3)降阶为 ΔQ_G 与 ΔV_G 的关系:

$$\Delta Q_G = \begin{bmatrix} -(J_{Q_G \theta_G} & J_{Q_G \theta_L} & J_{Q_G V_L}) J^{-1} \begin{pmatrix} J_{P_G V_G} \\ J_{P_L V_G} \\ J_{Q_L V_G} \end{pmatrix} + J_{Q_G V_G} \end{bmatrix} \Delta V_G \quad (4)$$

这样发电机无功功率对机端电压的灵敏度就可以被定义为发电机的雅可比矩阵:

$$J_G = -(J_{Q_G \theta_G} \quad J_{Q_G \theta_L} \quad J_{Q_G V_L}) J^{-1} \begin{pmatrix} J_{P_G V_G} \\ J_{P_L V_G} \\ J_{Q_L V_G} \end{pmatrix} + J_{Q_G V_G} \quad (5)$$

将 J 的模态变换 $J = \xi \Lambda \eta$ 代入式(5)可得:

$$J_G = -(J_{Q_G \theta_G} \quad J_{Q_G \theta_L} \quad J_{Q_G V_L}) \xi \Lambda^{-1} \eta \begin{pmatrix} J_{P_G V_G} \\ J_{P_L V_G} \\ J_{Q_L V_G} \end{pmatrix} + J_{Q_G V_G} = -\tilde{\xi} \Lambda^{-1} \tilde{\eta} + J_{Q_G V_G} \quad (6)$$

其中, Λ 为 J 的特征值对角阵; η, ξ 分别为左、右特征向量; $\tilde{\eta} = \eta (J_{P_G V_G} \quad J_{P_L V_G} \quad J_{Q_L V_G})^T$; $\tilde{\xi} = (J_{Q_G \theta_G} \quad J_{Q_G \theta_L} \quad J_{Q_G V_L}) \xi$ 。

潮流雅可比矩阵 J 在鼻子点处奇异, 其中有一个特征值 λ^* 为 0, 剩余的特征值为 Λ_r , 则式(6)在鼻子点处可写为:

$$J_G = -\tilde{\xi} \begin{pmatrix} (\lambda^*)^{-1} & 0 \\ 0 & \Lambda_r^{-1} \end{pmatrix} \tilde{\eta} + J_{Q_G V_G} = J_g + J_{Q_G V_G} \quad (7)$$

$$J_g = -\tilde{\xi} \begin{pmatrix} (\lambda^*)^{-1} & 0 \\ 0 & \Lambda_r^{-1} \end{pmatrix} \tilde{\eta} \quad (8)$$

$$|J_g^{-1}| = \left| -\tilde{\eta}^{-1} \begin{pmatrix} \lambda^* & 0 \\ 0 & \Lambda_r \end{pmatrix} \tilde{\xi}^{-1} \right| = -\lambda^* |\Lambda_r| |\tilde{\eta}^{-1}| |\tilde{\xi}^{-1}| = 0 \quad (9)$$

式(9)表明 J_g^{-1} 在鼻子点处也奇异, 并且有一个对应于系统电压崩溃模式 λ^* 的 0 特征值, 则 J_g 对应就有一个无穷大特征值, 同理 J_G 也有。 J_G 的模态变换如下:

$$J_G = \xi_g \Lambda_g \eta_g \quad (10)$$

其中, Λ_g, η_g, ξ_g 分别为 J_G 的特征值对角阵和左、右特征向量。

由此可见, 在发电机雅可比矩阵中也存在着系

统的临界模式并且对应于一个无穷大的值。 J_G 的无穷大特征值的物理意义为在鼻子点处发电机电压一个小的扰动会导致系统对发电机一个很大的无功需求,即模态电压已经失去了可控性,于是出现电压崩溃。

与传统的降阶 Q-V 雅可比矩阵相同,每台发电机对临界模式的参与程度决定了它在电压崩溃中的相对重要性。参与因子的定义如式(11)所示,它指示了不同发电机的参与程度。

$$\delta_{\text{PFG}} = \xi_{Gi} \eta_{Gi}^T \quad (11)$$

其中, η_{Gi} 、 ξ_{Gi} 分别为和 J_G 的临界模式 λ_i 相关的左、右特征向量,它们分别对应 η_G 的 i 行和 ξ_G 的 i 列。由这些参与因子的大小可以得出各发电机无功支撑能力的排序,参与因子越大发电机的无功支撑越重要,即发电机的无功备用也越有价值。

系统中各发电机都存在自身的无功上限,并且在运行过程中可能会达到,尤其在重负荷状态下更容易达到。因此,在计算发电机参与因子时有必要考虑其无功上限。发电机的无功输出范围主要受到发电机的励磁电流约束,当发电机达到无功限值时,其励磁电流将保持为常数不变,此时,发电机就相当于在同步电抗前接一个恒定的励磁电压源。用 PE 模型表示达到无功上限的发电机,其中 P 代表发电机的有功功率,E 代表发电机的励磁电压,如图 2 所示,图中 X_T 为变压器阻抗, X_S 为发电机同步电抗。PE 模型对发电机参与因子的影响体现为一个增加的电气距离和电压设定值。

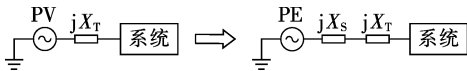


图 2 发电机模型转换

Fig.2 Model conversion of generator

1.3 系统无功备用定义

在一种给定的负荷增长方式下,系统无功备用的定义如下:

$$Q_{\text{RS}} = \sum_{i \in G} \delta_{\text{PFG}}^i Q_{\text{GR}}^i = \sum_{i \in G} \delta_{\text{PFG}}^i (Q_{G, \text{cr}}^i - Q_G^i) \quad (12)$$

其中, G 为发电机节点集; δ_{PFG}^i 为发电机 i 的参与因子。从式中可以看出,发电机的权重(参与因子)越大,则其无功备用越有价值;同时,发电机的无功备用越大,其对电压稳定的支撑作用也就越大。因此,系统无功备用可反映系统电压稳定裕度的相对大小。

2 无功备用的优化模型

2.1 系统无功备用优化问题

以前述系统无功备用定义为基础,为提高系统电压稳定裕度,本文建立了无功备用的优化模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & Q_{\text{RS}} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - L_0 - f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \\ \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max}, \mathbf{x} \in \{V_G, Q_C\} \\ \mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y} \leq \mathbf{y}_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

其中,函数 g 表示发电机发出的有功功率;函数 f 表示节点注入功率; L_0 为负荷功率; $\mathbf{x}$ 为控制变量(包括发电机机端电压 V_G 和电容器配置容量 Q_C); $\mathbf{x}_{\max}$ 、 $\mathbf{x}_{\min}$ 分别为 $\mathbf{x}$ 的上限和下限; $\mathbf{y}$ 为状态变量; $\mathbf{y}_{\max}$ 、 $\mathbf{y}_{\min}$ 分别为 $\mathbf{y}$ 的上限和下限。

在给定的系统负荷增长方式下,通过求解上述模型可以得到发电机、电容器无功源的优化配置,使系统的无功备用最大。

2.2 Benders 分解

由于每台发电机都会存在一定的无功限制,这会对发电机参与因子的大小和排序产生较大影响。一般情况下,在电压稳定临界点处无功越限的发电机都会有较小的参与因子,但这部分发电机如果不越限也有可能具有较大的参与因子,因此若将这类发电机控制到不越限,必然能更充分地发挥所有发电机的无功潜力。要使得发电机在临界点处无功不越限,可以通过调节其他发电机无功出力、投切电容器组等措施来实现。所以既要考虑发电机的无功越限对参与因子的影响,又要挖掘具有潜在价值的越限发电机的无功备用。

为解决这个问题,本文提出了一种基于 Benders 分解的双层优化模型,将原问题分解为发电机无功优化和电容器投切 2 个子问题,通过 2 个子问题的反复迭代最终获得最优解。发电机优化子问题是在电容器投入量固定的情况下对运行点处发电机的无功出力方式进行优化,使系统无功备用最大。电容器优化子问题则是在发电机机端电压不变的情况下,对运行点处的电容器容量进行优化,使系统无功备用最大,求解该问题可得到电容器的投切容量信息和系统无功备用信息,并以 Benders 割的形式返回至发电机优化问题中,从而得到新一轮的发电机机端电压。其基本过程如图 3 所示。

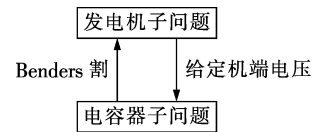


图 3 Benders 分解结构框图

Fig.3 Block diagram of Benders decomposition

求解电容器优化子问题时,发电机不受无功限制的约束,因此可通过调整电容器和变压器使越限而很有价值的发电机在临界点处不再越限;求解发电机优化子问题时,发电机会受无功限制的约束,此

时就不会出现无功价值高却发生越限的发电机。

2.3 电容器优化子问题

电容器投切问题是 Benders 分解结构中的下层优化子问题,其优化模型如式(14)所示,在发电机机端电压给定的情况下,该子问题是一个离散变量优化子问题。

$$\begin{cases} \max Q_{RS} \\ \text{s.t. } g(x, y) - L_0 - f(x, y) = 0 \\ Q_{Cmin} \leq Q_C^i \leq Q_{Cmax} \quad i = 1, 2, \dots, n_C \\ y_{min} \leq y \leq y_{max} \end{cases} \quad (14)$$

其中, Q_C^i 为补偿节点 i 的补偿容量, Q_{Cmin} 、 Q_{Cmax} 分别为其下限和上限; n_C 为补偿节点数。

2.4 发电机优化子问题

发电机调压问题是 Benders 分解结构中的上层优化子问题,其优化模型如式(15)~(17)所示,在电容器容量给定的情况下,该子问题是一个连续变量优化子问题。其目标函数为:

$$F_1 = \max Z \quad (15)$$

该子问题包含的约束为:

$$\begin{cases} g(V_g, y) - L_0 - f(V_g, y) = 0 \\ V_{Gmin} \leq V_G \leq V_{Gmax} \\ y_{min} \leq y \leq y_{max} \end{cases} \quad (16)$$

$$Z \leq Q_{RS} + \sum_{i=1}^{n_C} [\mu_i(Q_{Cmin}^i - Q_C^{i*}) + \lambda_i(Q_C^{i*} - Q_{Cmax}^i)] \quad (17)$$

其中, V_{Gmax} 、 V_{Gmin} 分别为 V_G 的上、下限; μ_i 、 λ_i 为电容器容量约束对应的对偶乘子。式(17)为 Benders 割的表达式。

3 求解算法

基于广义 Benders 分解结构的无功备用算法基本流程如下:

- 设定系统初始参数,包括发电机出力增长方式和负荷增长方式等;
- 以当前运行点为初始状态,应用连续潮流法搜索在电压稳定临界点处无功越限的发电机;
- 通过原对偶内点法求解发电机优化子问题,得到无功备用最优解 Q_{RSC} 和机端电压 V_G 优化值;
- 不计及发电机无功约束的情况下,求解电容器优化子问题得到无功备用的最优解 Q_{RSC} 和投切电容量 Q_C 的优化值以及对偶乘子 μ_i 、 λ_i ;
- 如果满足 $Q_{RSC} \leq Q_{RSG} + \varepsilon$ (ε 为一极小量),结束迭代,否则转入步骤 b。

3.1 发电机优化模型的求解算法

发电机优化子问题为只包含连续变量的非线性优化问题,本文采用原对偶内点法对其进行求解,求解过程如图 4 所示。

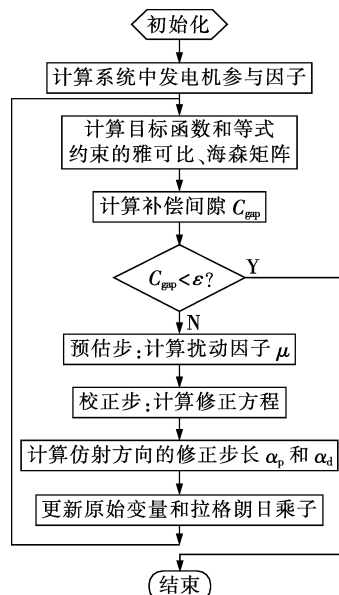


图 4 发电机问题求解流程

Fig.4 Flowchart of solving generator problem

3.2 电容器优化模型的求解算法

电容器优化子问题是一个非线性离散变量优化问题,整数梯度法的搜索方向是根据基点的梯度信息来构造的,因此具有局部性,且有时还会因取整出现方向发散的情况。本文采用离散直接搜索法 DDSM (Discrete Direct Search Method) 进行求解,在一定程度上克服了整数梯度法的局部性和有时因取整而方向发散的缺点^[19]。其求解过程如图 5 所示。

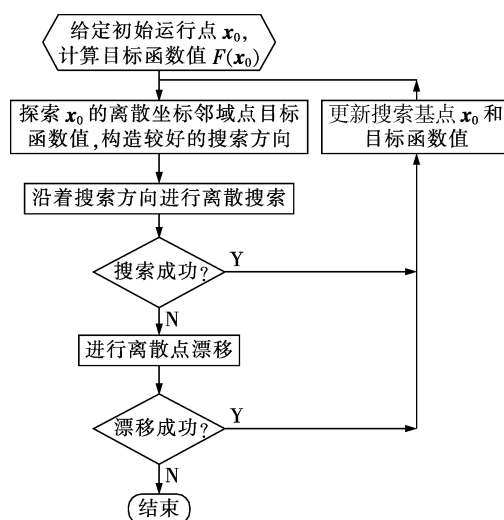


图 5 电容器问题的求解流程

Fig.5 Flowchart of solving capacitor problem

4 算例分析

将所提无功备用的优化方法在 IEEE 39 节点系统标准算例中进行测试,在节点 4、12、16 装设补偿电容器。发电机的无功上限如表 1 所示。

表 1 发电机无功上限

Table 1 Reactive power limits of generators

发电机节点	无功上限/Mvar	发电机节点	无功上限/Mvar
30	300	34	300
31	350	35	400
32	650	36	400
33	300	37	400

在计算考虑静态电压稳定的无功备用时,本文采用一种计算负荷裕度时常用的负荷/发电机增长方式,即对整个系统内按初值大小同比例增长的负荷功率根据发电机初始无功储备按比例分配,对于其他的负荷增长方式,文中方法也同样适用。

初始状态下,在系统电压稳定临界点处,发电机 31、32 分别达到了无功上限。而经过优化之后,发电机 32 在电压临界点处没有达到其无功上限,这主要是由于优化结果使得电容器投入增多,从而置换出了发电机 32 的无功备用。发电机参与因子如图 6 所示,从图中可见,发电机 32 的参与因子在考虑其无功约束和不考虑的情况下变化较大,这主要是由发电机 32 具有较大的同步电抗造成的。

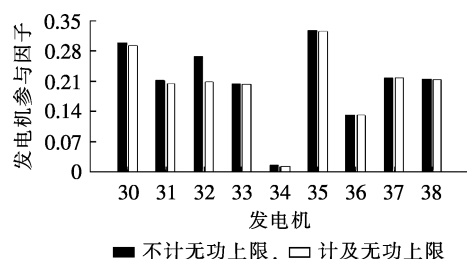


图 6 IEEE 39 节点系统的发电机参与因子

Fig.6 Generator participation factors of IEEE 39-bus system

本文分别使用和不使用 Benders 分解方法求解无功备用优化模型。不使用 Benders 分解方法求解时,在计算发电机参与因子过程中计及发电机无功上限的影响,此时得到优化后的系统 PV 曲线如图 7 中优化结果 2 所示(图中 V_{15} 为节点 15 的电压)。采用 Benders 分解方法求解时,原模型被分解为 2 个子问题,在求解电容器优化子问题时不再计及发电机无功上限对其参与因子的影响,此时得到优化后的系统 PV 曲线如图 7 中优化结果 1 所示。显然,优化结果 2 具有更大的电压稳定裕度。这是由于发电机

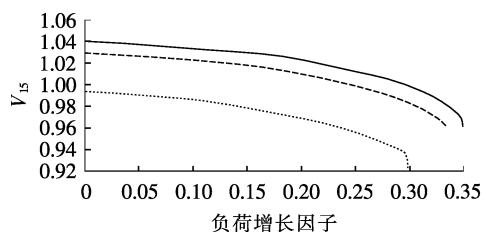


图 7 IEEE 39 节点系统电压稳定裕度对比

Fig.7 Comparison of PV curves for IEEE 39-bus system

32 在没有达到无功上限时参与因子较大,通过分解方法有效地将其无功备用置换出来。

5 结论

本文提出了一种通过系统发电机无功备用来改善系统静态电压稳定裕度的方法。通过引入发电机参与因子来对不同发电机无功备用的贡献进行评估,从而进一步得到考虑系统静态电压稳定的系统无功备用,在此基础上又提出了以系统无功备用最大化目标的优化模型,以实现改善系统静态电压稳定裕度的效果。

由于发电机都存在一定的无功容量限制,这会对发电机参与因子的大小和排序产生一定影响。为了能够更充分地挖掘参与因子大而又发生越限的发电机无功备用的价值,提出了一种 Benders 分解的双层规划模型,将原问题分解为发电机优化模型和电容器优化模型,这样不仅更有利于原问题的求解,同时通过电容器和发电机的协调控制可以实现对发电机无功备用更加合理、有效的利用。

参考文献:

- [1] VAN CUTSEM T. A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 145-156.
- [2] TAYLOR C. Power System Voltage Stability[M]. 北京:中国电力出版社, 2001: 29-32.
- [3] 杨堤,程浩忠,马则良,等. 考虑直流电压交互影响的交直流混联系统无功规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 96-101. YANG Di, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Reactive power planning considering voltage interaction among HVDCs for hybrid AC-DC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 96-101.
- [4] HAUER J F, BHATT N B, SHAH K. Performance of "WAMS East" in providing dynamic information for the North East blackout of August 14, 2003 [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Denver, USA: [s.n.], 2004: 9-13.
- [5] 孙全才,程浩忠,马则良,等. 发电机无功备用的评估与优化方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5163-5172. SUN Quancai, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. A review on the evaluation and optimization of generator reactive power reserve [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5163-5172.
- [6] CAPITANESCU F, VAN CUTSEM T. Evaluation of reactive power reserves with respect to contingencies [C] // Bulk Power System Dynamics and Control V. Onomichi, Japan: [s.n.], 2001: 377-386.
- [7] MOUSAVI O A, BOZORG M, AHMADI-KHATIR A, et al. Reactive power reserve management: preventive countermeasure for improving voltage stability margin [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: [s.n.], 2012: 25-29.
- [8] CHOI Y H, SEO S, KANG S, et al. Justification of effective reactive power reserves with respect to a particular bus using linear sensitivity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2118-2124.

- [9] SEO S, KANG S G, CHOI Y H, et al. Verification of effective reactive power reserve with respect to reactive power load demands in the power system [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN, USA: [s.n.], 2010: 36-39.
- [10] LEONARDI B, AJJARAPU V. An approach for real time voltage stability margin control via reactive power reserve sensitivities [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 615-625.
- [11] 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.
- [12] PAKARI H, KHAJEHZADEH A. Reactive power reserve maximization using intelligent method [J]. Cademie Royale Des Sciences D Outremere Bulletin Des Seances, 2015, 4(2): 245-253.
- [13] XU W, ZHANG Y, DA SILVA L, et al. Competitive procurement of dynamic reactive power support service for transmission access [C] // IEEE PES Summer Meeting. Seattle, WA, USA: [s.n.], 2000: 543-548.
- [14] ARYA L D, TITARE L S, KOTHARID P. Improved particle swarm optimization applied to reactive power reserve maximization [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(5): 368-374.
- [15] LEONARDI B, AJJARAPU V. Investigation of various Generator Reactive Power Reserve (GRPR) definitions for online voltage stability/security assessment [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh, PA, USA: [s.n.], 2008: 15-20.
- [16] ALIZADEH M O, CHERKAoui R. Maximum voltage stability margin problem with complementarity constraints for multi-area power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2993-3002.
- [17] 宋越, 程浩忠, 张健, 等. 基于电压控制分区的发电机无功备用优化方法 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 33-39.
SONG Yue, CHENG Haozhong, ZHANG Jian, et al. Multi-level voltage control partitioning based on multi-objective modularity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 33-39.
- [18] HUANG Z, BAO L, XU W. Generator ranking using modal analysis [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 709-716.
- [19] 伍开松, 孟坤六. 一种约束非线性离散优化问题的直接搜索法 [J]. 西南石油学院学报, 1989, 11(3): 75-84.
WU Kaisong, MENG Kunliu. Discrete constrained direct search method for a nonlinear discretization problem [J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 1989, 11(3): 75-84.

作者简介:



孙全才 (1978—), 男, 安徽淮南人, 博士, 主要研究方向为电力系统电压稳定和电气试验技术 (E-mail: fictious@163.com)。

Reactive power reserve optimization method for generator based on Benders decomposition

SUN Quancai^{1,2}, CHENG Haozhong¹, SONG Yue³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Nanning Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530022, China;

3. Department of Electrical and Electronics Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Since the voltage stability margin is closely related with the reactive power reserve, a reactive power reserve optimization method for var source is proposed. The participation factor of generator is used to measure the importance of reactive power reserve of generator. Taking the maximum reactive power reserve of power system as objective, an optimization model is built, and then decomposed into master problem of generator and sub-problem of capacitor by Benders decomposition. A case of IEEE 39-bus system verifies the effectiveness of the proposed optimization method, and the optimization scheme significantly improves the voltage stability margin of system.

Key words: Benders decomposition; reactive power reserve of generator; participation factor of generator; voltage stability; optimization