

基于奔德斯算法的 静态安全稳定约束协调控制阻塞管理

邹晓松, 罗先觉

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Benders Decomposition Based Static Security and Stability-constrained Congestion Management by Coordinated Controls

ZOU Xiao-song, LUO Xian-jue

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: This paper presents a static security and stability constrained congestion management method considering multicontingency for real-time electricity markets. An optimal power flow model was constructed with coordinated operating constraints and static voltage stability constraints. Because of different levels of static security and stability requirements under different operating conditions, the preventive and corrective controls were presented to handle the constraints considering the role of interruptible loads. Based on Benders decomposition, the preventive and corrective controls problems were solved in a coordinated way. Simulation results on IEEE 30 system validated the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: congestion management; static security and stability; Benders decomposition; coordinated preventive and corrective control

摘要: 提出了一种适用于实时平衡市场的多预想故障静态安全稳定约束阻塞管理方法。建立协调运行约束与静态电压稳定约束的最优潮流模型, 实现了运行约束与静态电压稳定约束的协调控制。针对系统在不同运行状态时的静态安全稳定要求, 并考虑可中断负荷的作用, 将不同状态静态安全稳定约束进行分解, 分别建立了预防控制及校正控制阻塞管理模型。在奔德斯(Benders)分解算法基础上, 提出了预防及校正阻塞管理的协调控制算法。通过对 IEEE 30 节点系统的数值仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 阻塞管理; 静态安全稳定; 奔德斯分解算法; 预防及校正协调控制

0 引言

满足正常及预想故障条件下的安全稳定约束是电力系统安全稳定运行的重要保证。电力系统的安全稳定约束可以分为以下 2 种类型: 1) 运行约

束(包括线路潮流约束、节点电压约束); 2) 稳定性约束(主要包括电压稳定以及功角稳定约束)。其中线路潮流约束、节点电压以及静态电压稳定约束涉及的是系统的安全稳定问题。关于静态安全稳定预防及校正控制方法已取得大量的研究成果^[1-5]。文献[1-2]提出了静态电压稳定校正控制减负荷方法; 文献[3-5]则建立了基于灵敏度分析的静态安全稳定预防及增强控制的线性优化模型及算法。

电力市场条件下一般采用 2 种模式来处理系统安全稳定约束: 一种是采用节点电价模式, 节点电价中除了包含电能价格外还包含系统的安全稳定成本; 另一种模式是在电能交易完成后通过日前市场和实时市场中的阻塞管理消除网络阻塞, 得到安全稳定控制成本, 再按照某种分摊原则分摊到各个负荷及发电机节点。在以上 2 种模式中处理系统动态稳定约束仍有一定困难, 报道的文献较少^[6], 目前电力市场条件下一般都只考虑静态安全稳定约束的影响^[7-12]。文献[7-10]主要考虑支路电流以及节点电压约束, 文献[11-12]进一步考虑了静态电压稳定性约束, 但文献[11-12]都没有考虑预想故障的影响。

与线性优化模型^[3-5]相比最优潮流便于综合考虑系统在不同运行状态下的运行约束及静态电压稳定约束^[11,13-14]。文献[13]提出了一种应用于日前市场阻塞管理的最优潮流模型, 该模型包括: 系统正常状态当前运行点的潮流方程及运行约束, 负荷增加到满足最小负荷裕度要求时运行点的潮流方程及相应的运行约束。文献[14]则研究了故障发生后进行校正控制时的切负荷方法, 模型中包含故障后系统当前运行点及负荷增加到满足最小负荷裕

度要求时新运行点的潮流方程。以上模型中的 2 组潮流方程分别对应系统的 2 个运行点,文献[11,13-14]将这 2 个运行点对应的系统节点电压(包括发电机机端电压)都作为独立变量进行求解,不能保证系统能从正常状态或故障后状态的当前运行点过渡到负荷增加以后的运行点,系统的运行约束及静态电压稳定约束之间缺乏协调。

可中断负荷对电力系统安全经济运行可以发挥重要作用,充分合理地利用可中断负荷可以提高系统的安全经济运行水平^[15-17]。文献[15-16]考虑了可中断负荷在输电阻塞管理的作用,文献[17]讨论了可中断负荷参与系统故障后校正控制时的补偿机制。

本文提出了一种适用于实时市场的多预想故障静态安全稳定约束协调控制阻塞管理方法。首先建立协调正常状态及预想故障状态运行约束和静态电压稳定约束的最优潮流阻塞管理模型;将可中断负荷引入实时市场中的静态安全稳定预防校正控制,并在奔德斯分解算法的基础上实现了系统预防及校正阻塞管理的协调控制。最后对 IEEE 30 系统进行的仿真验证了本文提出方法的有效性。

1 协调静态安全稳定约束的预防及校正控制阻塞管理模型

1.1 实时市场中阻塞管理预防及校正控制策略

为了尽量减小阻塞管理对用户在日常市场中已达成交易的影响,并降低实时市场中阻塞管理的费用,针对电网正常状态以及故障状态分别提出了预防控制及校正控制阻塞管理方法。对系统正常状态而言,预防控制的目标是保证系统满足当前状态的运行约束及静态电压稳定约束,而且当预想故障发生时系统不会发生静态电压失稳,即保证当前电网正常而且安全;当某种预想事故实际发生后,通过校正控制措施,使系统满足该故障条件下的运行约束,并且使系统在该故障条件下具有足够的负荷裕度,以防止负荷增加或N-2故障时可能造成的静态电压失稳,即校正控制保证系统在故障条件下正常与安全。

本文提出的方法适用于实时平衡市场中的阻塞管理。实时平衡市场的主要功能是维护电能实时平衡以及消除系统在运行过程中可能出现的网络阻塞。除了利用发电商向实时平衡市场提交的功率调整量及报价外,本文将可中断负荷引入实时市场中的阻塞管理,并针对可中断负荷参与预想故障发

生前的预防控制和预想故障实际发生后的校正控制对负荷的不同影响,分别建立相应的预防控制及校正控制阻塞管理模型。

1.2 预防控制阻塞管理模型

与文献[18]不同,基于最优潮流的静态安全稳定约束阻塞管理模型,一般只考虑发电机及负荷节点功率调整所产生的费用^[11,13-14]。发电机机端电压虽然不出现在目标函数中,但仍属于控制变量的一部分,因此控制变量包括发电机节点、负荷节点功率调整量以及发电机机端电压。

预防控制要达到的目标是:1)预防控制后,系统满足正常状态当前运行点的运行约束及静态电压稳定约束;2)当预想故障发生时,在不施加任何新的控制措施的前提下,系统能从正常状态当前运行点过渡到故障后的运行点,不发生静态电压失稳。与文献[11,13-14]的模型不同,在预防控制模型中需要添加系统在负荷增加以后以及故障后对应运行点的发电机机端电压约束^[18]。这样系统正常状态当前运行点的运行约束与负荷增加后和故障后的静态电压稳定约束才能协调,才能保证故障发生后且校正控制实施前系统不会产生静态电压失稳。因此根据预防控制阶段的控制目标及相应约束,预防控制静态安全稳定约束阻塞管理模型构造如下:

1) 目标函数。

$$F_{Cmin}^p = \min F_C^p \quad (1)$$

F_C^p 为阻塞管理成本,其表达式为

$$F_C^p = \sum_{i \in N_G} C_{Gi}^{up} \Delta P_{Gi}^{pup} + \sum_{i \in N_G} C_{Gi}^{down} \Delta P_{Gi}^{pdown} + \sum_{i \in N_{Dp}} C_{Di}^{down} \Delta P_{Di}^{pdown} \quad (2)$$

式中: N_G 为实时市场中参加阻塞管理的发电机节点(不包括平衡节点); N_{Dp} 为参加预防控制阻塞管理的负荷节点; ΔP_{Gi}^{pup} 、 ΔP_{Gi}^{pdown} 分别为发电机 i 在预防控制阶段有功出力增加及减少调整量; C_{Gi}^{up} 、 C_{Gi}^{down} 分别为发电机 i 有功出力增加及减少调整报价; ΔP_{Di}^{pdown} 为节点 i 可中断负荷在预防控制阶段的有功功率减小调整量; C_{Di}^{down} 为节点 i 可中断负荷在预防控制阶段有功功率减小调整报价(或已达成的合同价格)。

2) 等式约束。

$$(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{pup} - \Delta P_{Gi}^{pdown}) - (P_{Di} - \Delta P_{Di}^{pdown}) = P_i(Y, U, \theta) \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - (Q_{Di} - \Delta Q_{Di}^{pdown}) = Q_i(Y, U, \theta) \quad (4)$$

$$(1 + \lambda_0)(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{pup} - \Delta P_{Gi}^{pdown}) - (1 + \lambda_0)(P_{Di} - \Delta P_{Di}^{pdown}) = P_i'(Y, U', \theta') \quad (5)$$

$$Q'_{Gi} - (1 + \lambda_0)(Q_{Di} - \Delta Q_{Di}^{\text{pdown}}) = Q'_i(\mathbf{Y}, \mathbf{U}', \boldsymbol{\theta}') \quad (6)$$

$$(1 + \lambda_k)(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{\text{pup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{pdown}}) - (1 + \lambda_k)(P_{Di} - \Delta P_{Di}^{\text{pdown}}) = P_i^k(\mathbf{Y}^k, \mathbf{U}^k, \boldsymbol{\theta}^k) \quad (7)$$

$$Q_{Gi}^k - (1 + \lambda_k)(Q_{Di} - \Delta Q_{Di}^{\text{pdown}}) = Q_i^k(\mathbf{Y}^k, \mathbf{U}^k, \boldsymbol{\theta}^k) \quad (8)$$

$$\Delta Q_{Di}^{\text{pdown}} = \Delta P_{Di}^{\text{pdown}} \frac{Q_{Di}^0}{P_{Di}^0} \quad (9)$$

式中: $i = \{1, \dots, (n-1)\}$, 除平衡节点 n 以外的所有节点; $k = \{1, \dots, m_1\}$, 系统预防控制故障集 N_k (失稳故障) 中的第 k 个故障; P_{Gi}^0 为日前市场确定的节点 i 发电机有功出力; $P_{Di} = P_{Di}^0 + \Delta P_{Di}$, P_{Di}^0 为日前市场确定的负荷节点 i 的有功功率, ΔP_{Di} 为短期负荷预测得出的负荷节点 i 在下一时段的有功功率变化量; $Q_{Di} = Q_{Di}^0 + \Delta Q_{Di}$, Q_{Di}^0 为日前市场确定的负荷节点 i 的无功功率, ΔQ_{Di} 为短期负荷预测得出的负荷节点 i 在下一时段的无功功率变化量; $\mathbf{Y}$ 为系统正常状态网络节点导纳矩阵; $\mathbf{Y}^k$ 为系统在故障 k 时网络的节点导纳矩阵; λ_0 为系统在正常状态时的负荷裕度; λ_k 为系统在故障 k 时的负荷裕度; $\mathbf{U}$, $\boldsymbol{\theta}(\mathbf{U}', \boldsymbol{\theta}')$ 分别为系统正常状态当前运行点 (负荷裕度为 λ_0 时运行点) 节点电压幅值向量及相角向量; $\mathbf{U}^k$, $\boldsymbol{\theta}^k$ 分别为系统在故障状态 k 时节点电压幅值向量及相角向量。

式(3)、(4)为正常状态当前运行点时的潮流方程; 式(5)、(6)为正常状态负荷裕度为 λ_0 时运行点潮流方程; 式(7)、(8)为故障状态 k 时的潮流方程; 式(9)负荷按等功率因素消减等式约束。式(5)~(6)及(7)~(8)中负荷功率增加及发电机出力的调节方式与一般研究静态电压问题的文献[13-14,18]处理方式类似。

3) 不等式约束。

$$P_{Gi}^{\min} \leq (1 + \lambda_0)(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{\text{pup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{pdown}}) \leq P_{Gi}^{\max} \quad (10)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (11)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q'_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (12)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi}^k \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (13)$$

$$u_i^{\min} \leq u_i \leq u_i^{\max} \quad (14)$$

$$I_{ij}^2 \leq (I_{ij}^{\max})^2 \quad (15)$$

$$u_i^{\min} \leq u'_{Gi} \leq u_{Gi} \quad (16)$$

$$u_i^{\min} \leq u_{Gi}^k \leq u_{Gi} \quad (17)$$

$$\lambda_0 \geq \lambda_{0\min} \quad (18)$$

$$\lambda_k \geq \lambda_{k\min} \quad (19)$$

$$0 \leq \Delta P_{Di}^{\text{pdown}} \leq H_1 P_{Di}^0 \quad (20)$$

式(10)系统发电机有功出力约束; 式(11)~(13)分别为系统正常状态当前运行点、负荷裕度为 λ_0 时的运行点, 以及故障 k 时发电机的无功出力约束; 式(14)~(15)为系统正常状态当前运行点运行约束;

式(16)~(17)为系统正常状态负荷裕度为 λ_0 时及故障 k 负荷裕度为 λ_k 时运行点处发电机节点电压约束, 只有满足式(16)~(17)才能保证系统能从式(3)~(4)对应的当前运行点过渡到式(5)~(6)及式(7)~(8)对应的运行点; 式(18)~(19)为系统正常状态及故障 k 时对应的最小负荷裕度约束 (当 $\lambda_{k\min} = 0$ 时静态电压稳定控制以恢复失稳故障潮流解为目的); 式(20)为节点 i 在预防控制阶段的最大可中断负荷比例约束。系统在实际运行中发生故障时, 若系统运行参数不超过对应的事故过负荷能力, 则允许系统运行一段时间, 以便通过校正控制加以消除^[19-20]。所以不等式约束中不包含故障 k 时的运行约束, 故障时的运行约束在校正控制中考虑。

1.3 校正控制阻塞管理模型

为了保证系统在故障条件下处于正常和安全的状态, 采用预防控制手段则控制成本过高。当故障发生后再实施校正控制使系统恢复到正常和安全状态可以大大减小控制成本。本文提出的校正控制是在短期负荷预测的基础上, 提前得到在预想事故实际发生后系统需要采取的控制行为。在校正阶段得到的发电机和节点可中断负荷的调整量在实时运行中并不一定实施, 具有相当的不确定性。这种不确定性对发电机的功率调整没有本质的不同, 因此发电机的功率调整报价在校正控制阶段与预防控制阶段相同。预防控制和校正控制对可中断负荷的影响不同, 预防控制中的可中断负荷量和中断时间长短具有确定性可以预先通知, 但校正控制阶段涉及的可中断负荷是否实施以及当事故发生后需要中断多久都具有不确定性。因此可中断负荷在校正控制阶段的调整量一般比在预防控制阶段小, 报价 (或合同价格) 也相应较高^[17]。由于校正控制的不确定性, 该阶段所产生的阻塞管理成本只是一种期望成本, 只有当预想故障实际发生后才会产生。

结合校正控制阶段的控制目标及约束条件, 校正控制阻塞管理模型构造如下:

1) 目标函数。

$$\min F_C^c = \sum_{i \in N_G} C_{Gi}^{\text{up}} \Delta P_{Gi}^{\text{cup}} + \sum_{i \in N_G} C_{Gi}^{\text{down}} \Delta P_{Gi}^{\text{cdown}} + \sum_{i \in N_{Dc}} C_{Di}^{\text{down}} \Delta P_{Di}^{\text{cdown}} \quad (21)$$

式中: F_C^c 为校正控制阶段阻塞管理成本; N_{Dc} 为参加校正控制阻塞管理的负荷节点; $\Delta P_{Gi}^{\text{cup}}$ 、 $\Delta P_{Gi}^{\text{cdown}}$ 分别为校正控制阶段发电机 i 的有功功率增加及减少调整量; C_{Gi}^{up} 、 C_{Gi}^{down} 分别为发电机 i 有功功率增加

及减少调整报价； $\Delta P_{Di}^{\text{cdown}}$ 为节点 i 的可中断负荷在校正控制阶段的有功功率减小调整量； C_{Di}^{cdown} 为节点 i 可中断负荷在校正控制阶段的有功功率减小调整价格。

2) 等式约束

$$(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{\text{pup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{pdown}} + \Delta P_{Gi}^{\text{cup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{cdown}}) - (P_{Di} - \Delta P_{Di}^{\text{pdown}} - \Delta P_{Di}^{\text{cdown}}) = P_i^\gamma(Y^\gamma, U^\gamma, \theta^\gamma) \quad (22)$$

$$Q_{Gi}^\gamma - (Q_{Di} - \Delta Q_{Di}^{\text{pdown}} - \Delta Q_{Di}^{\text{cdown}}) = Q_i^\gamma(Y^\gamma, U^\gamma, \theta^\gamma) \quad (23)$$

$$(1 + \lambda_\gamma)(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{\text{pup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{pdown}} + \Delta P_{Gi}^{\text{cup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{cdown}} - P_{Di} + \Delta P_{Di}^{\text{pdown}} + \Delta P_{Di}^{\text{cdown}}) = P_i^{\lambda_\gamma}(Y^\gamma, U^{\lambda_\gamma}, \theta^{\lambda_\gamma}) \quad (24)$$

$$Q_{Gi}^{\lambda_\gamma} - (1 + \lambda_\gamma)(Q_{Di} - \Delta Q_{Di}^{\text{pdown}} - \Delta Q_{Di}^{\text{cdown}}) = Q_i^{\lambda_\gamma}(Y^\gamma, U^{\lambda_\gamma}, \theta^{\lambda_\gamma}) \quad (25)$$

$$\Delta Q_{Di}^{\text{cdown}} = \Delta P_{Di}^{\text{cdown}} Q_{Di}^0 / P_{Di}^0 \quad (26)$$

式中： $\gamma = \{1, \dots, m_2\}$ ，为集合 N_γ (需要进行校正控制的故障集) 中第 γ 个故障； Y^γ 为在故障 γ 条件下网络的节点导纳矩阵； U^γ 、 $\theta^\gamma(U^{\lambda_\gamma}, \theta^{\lambda_\gamma})$ 分别为故障 γ 时当前运行点(负荷裕度为 λ_γ 时运行点)系统节点电压幅值向量及相角向量； λ_γ 为故障 γ 发生时校正控制后系统的负荷裕度。

式(22)、(23)为故障 γ 条件下系统当前运行点时的潮流方程；式(24)、(25)为故障 γ 条件下负荷裕度为 λ_γ 时的潮流方程。

3) 不等式约束。

$$P_{Gi}^{\min} \leq (1 + \lambda_\gamma)(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{\text{pup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{pdown}}) + (1 + \lambda_\gamma) \cdot (\Delta P_{Gi}^{\text{cup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{cdown}}) \leq P_{Gi}^{\max} \quad (27)$$

$$\Delta P_{Gi}^{\text{cup}} \leq \Delta P_{Gi}^{\text{upmax}} \quad (28)$$

$$\Delta P_{Gi}^{\text{cdown}} \leq \Delta P_{Gi}^{\text{downmax}} \quad (29)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi}^\gamma \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (30)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi}^{\lambda_\gamma} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (31)$$

$$u_i^{\min} \leq u_i^\gamma \leq u_i^{\max} \quad (32)$$

$$(I_{ij}^\gamma)^2 \leq (I_{ij}^{\max})^2 \quad (33)$$

$$u_i^{\min} \leq u_{Gi}^{\lambda_\gamma} \leq u_{Gi}^{\max} \quad (34)$$

$$\lambda_\gamma \geq \lambda_{\gamma\min} \quad (35)$$

$$0 \leq \Delta P_{Di}^{\text{cdown}} \leq H_2 P_{Di}^0 \quad (36)$$

式(27)为发电机有功出力约束；式(28)、(29)为发电机节点 i 的有功出力爬升约束；式(30)、(31)为系统在故障 γ 时当前运行点及负荷裕度为 λ_γ 时运行点发电机无功出力约束；式(32)、(33)系统在故障 γ 当前运行点时运行约束；式(34)与式(16)~(17)的作用相同；式(35)为系统在故障 γ 时负荷裕度约束；

式(36)节点 i 在校正控制阶段最大可中断负荷比例约束。

2 基于奔德斯分解的预防及校正协调控制优化算法

2.1 奔德斯分解算法

在预防控制阻塞管理完成后，如果可用于校正控制的可中断负荷功率调整量不足，或受发电机出力爬升约束的限制，在某些严重故障条件下校正控制可能无解。本文提出了一种基于奔德斯分解算法的预防校正控制协调算法。根据奔德斯分解算法思想分别建立与预防控制相对应的主问题和与校正控制对应的子问题，当子问题无解时向主问题返回对应的奔德斯割，对主问题的最优解进行修正，主问题与子问题进行交替求解。根据奔德斯分解算法，子问题与主问题的构造如下。

2.2 子问题的构造

以每个无解的校正控制问题定义一个子问题，设无解故障集为 N_S 。第 t 次迭代过程中， N_S 中的第 s 个预想故障对应的子问题其目标函数定义为

$$\min M = M_1 + K_S M_2 \quad (37)$$

$$\text{式中：} M_1 = \sum_{i \in N_G} C_{Gi}^{\text{up}} \Delta P_{Gi}^{\text{cup}} + \sum_{i \in N_G} C_{Gi}^{\text{down}} \Delta P_{Gi}^{\text{cdown}} + \sum_{i \in N_{DC}} C_{Di}^{\text{cdown}} \cdot \Delta P_{Di}^{\text{cdown}} ; M_2 = \sum_{i=1}^{(n-1)} \sum_{l=1}^2 (M_{li}^{\text{pin}} + M_{li}^{\text{pout}} + M_{li}^{\text{qin}} + M_{li}^{\text{qout}})。$$

子问题包含原校正控制的约束条件(27)~(36)，式(22)~(25)用(38)~(41)代替，并增加约束(42)：

$$(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{\text{pup}(t)} - \Delta P_{Gi}^{\text{pdown}(t)} + \Delta P_{Gi}^{\text{cup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{cdown}}) - (P_{Di} - \Delta P_{Di}^{\text{pdown}(t)} - \Delta P_{Di}^{\text{cdown}}) + M_{1i}^{\text{pin}} - M_{1i}^{\text{pout}} = P_i^s(Y^s, U^s, \theta^s) \quad (38)$$

$$Q_{Gi}^s - (Q_{Di} - \Delta Q_{Di}^{\text{pdown}(t)} - \Delta Q_{Di}^{\text{cdown}}) + M_{1i}^{\text{qin}} - M_{1i}^{\text{qout}} = Q_i^s(Y^s, U^s, \theta^s) \quad (39)$$

$$(1 + \lambda_s)(P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^{\text{pup}(t)} - \Delta P_{Gi}^{\text{pdown}(t)} + \Delta P_{Gi}^{\text{cup}} - \Delta P_{Gi}^{\text{cdown}}) - (1 + \lambda_s)(P_{Di} - \Delta P_{Di}^{\text{pdown}(t)} - \Delta P_{Di}^{\text{cdown}}) + M_{2i}^{\text{pin}} - M_{2i}^{\text{pout}} = P_i^{\lambda_s}(Y^s, U^{\lambda_s}, \theta^{\lambda_s}) \quad (40)$$

$$Q_{Gi}^{\lambda_s} - (1 + \lambda_s)(Q_{Di} - \Delta Q_{Di}^{\text{pdown}(t)} - \Delta Q_{Di}^{\text{cdown}}) + M_{2i}^{\text{qin}} - M_{2i}^{\text{qout}} = Q_i^{\lambda_s}(Y^s, U^{\lambda_s}, \theta^{\lambda_s}) \quad (41)$$

$$\begin{cases} 0 \leq M_{li}^{\text{pin}} \\ 0 \leq M_{li}^{\text{pout}} \\ 0 \leq M_{li}^{\text{qin}} \\ 0 \leq M_{li}^{\text{qout}} \end{cases} \quad (42)$$

为了使预想故障的校正控制有解，在故障后的潮流方程(22)~(25)中需要增加虚拟功率不平衡

量 M_{li}^{pin} 、 M_{li}^{pout} 、 M_{li}^{qin} 、 M_{li}^{qout} ($i=1, \dots, n-1$; $l=1, 2$)。

式(37)中的系数 K_s 一般取一个较大的数, 以保证优先调整校正控制变量的值以获得最优解, 校正控制变量调节量不够时通过在部分节点注入一定的虚拟功率以得到校正控制的最优解。

子问题以校正控制阻塞管理费用以及各节点的虚拟功率不平衡量的和最小为目标函数。第 t 次迭代过程中主问题的最优解为 $\Delta P_{Gi}^{pup(t)}$ 、 $\Delta P_{Gi}^{pdown(t)}$ 、 $\Delta P_{Di}^{pdown(t)}$, 是主问题与子问题之间的耦合变量。该最优解能使系统满足预防控制阶段的约束条件, 若校正控制在预防控制的最优解处无解, 则需要构造上述子问题, 并从子问题的最优解处向预防控制主问题返回奔德斯割, 重新求解含奔德斯割的主问题, 对原有的主问题最优解进行修正。主问题与子问题交替迭代求解, 若在主问题最优解处, 子问题的最优解 M^* 与 M_1^* 相等, M_2^* 的值为零, 则说明在主问题(预防控制)的最优解处子问题(校正控制)有解。算法结束。

2.3 主问题的构造

主问题与预防控制相对应, 由目标函数式(1)、约束(3)~(20)以及由子问题返回的奔德斯割构成。

($t-1$)次迭代中第 s 个子问题在 $\Delta P_{Gi}^{pup(t-1)}$ 、 $\Delta P_{Gi}^{pdown(t-1)}$ 、 $\Delta P_{Di}^{pdown(t-1)}$ 条件下的最优解为 $M^{*(t-1)}$, 式(38)~(39)对应的拉格朗日乘子分别为 $\mu_{sp_1}^{(t-1)}$ 、 $\mu_{sq_1}^{(t-1)}$, 式(40)~(41)对应的拉格朗日乘子分别为 $\mu_{sp_2}^{(t-1)}$ 、 $\mu_{sq_2}^{(t-1)}$ 。第 t 次迭代中第 s 个故障对应的子问题返回到主问题的奔德斯割可以表示成如下的不等式约束:

$$\begin{aligned} M_2^{*(t-1)} + \sum_{i \in N_G} \sum_{l=1}^2 \mu_{sp_l(i)}^{(t-1)} (\Delta P_{Gi}^{pup} - \Delta P_{Gi}^{pup(t-1)}) - \\ \sum_{i \in N_G} \sum_{l=1}^2 \mu_{sq_l(i)}^{(t-1)} (\Delta P_{Gi}^{pdown} - \Delta P_{Gi}^{pdown(t-1)}) + \\ \sum_{i \in N_{Dp}} \sum_{l=1}^2 (\mu_{sp_l(i)}^{(t-1)} + \mu_{sq_l(i)}^{(t-1)}) \frac{Q_{Di}^0}{P_{Di}^0} (\Delta P_{Di}^{pdown} - \\ \Delta P_{Di}^{pdown(t-1)}) \leq 0 \end{aligned} \quad (43)$$

显然在第一轮迭代中主问题不含约束(43)。

2.4 基于奔德斯分解的预防及校正协调控制算法实现

预防控制阻塞管理模型是一个含多预想故障静态电压稳定约束的最优潮流模型, 但实际系统在运行中静态电压失稳故障的数量并不大, 所以预想故障约束的数量也不大。而校正控制阻塞管理模型

则是一个只含单故障运行约束及静态电压稳定约束的最优潮流模型。原-对偶内点法是目前在电力系统中应用广泛的优化算法, 便于求解含多故障运行约束及静态电压稳定约束的最优潮流模型, 其计算速度可以满足在线应用的要求^[18]。本文也采用了原-对偶内点法对提出的优化模型进行求解。预防及校正协调控制总的算法流程如图1所示。

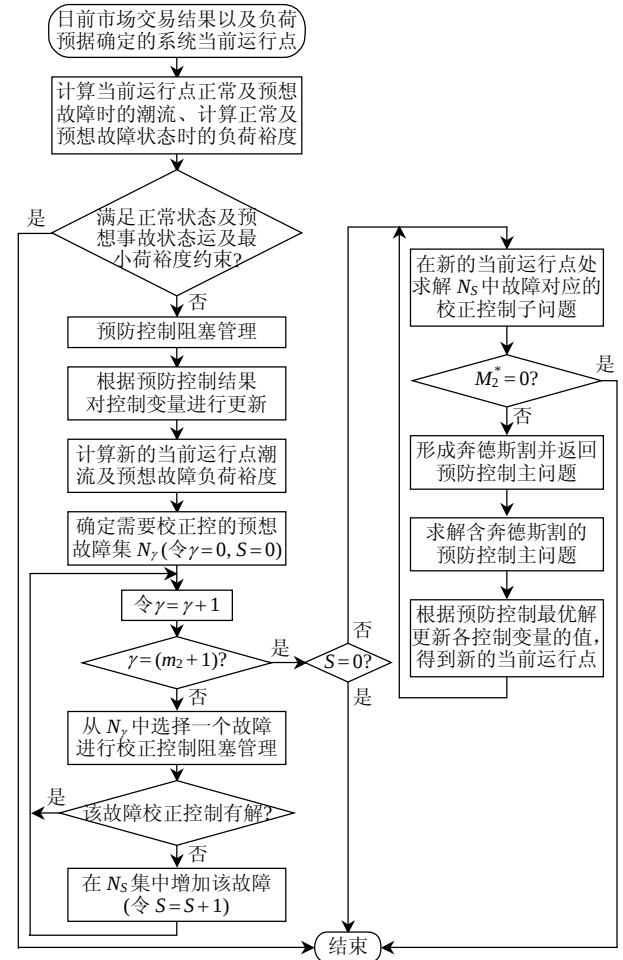


图1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm

3 仿真实例

3.1 数据准备

本文在数值仿真中采用的是IEEE 30 节点系统^[21], 对其中部分参数作了如下的改动: 支路电抗增加到原值的 1.6 倍, 除平衡机外所有发电机有功出力增加为原来的 1.4 倍, 各节点负荷功率增加到原值的 1.4 倍作为日前市场交易量及短期负荷增加量的和。为了使系统在故障条件下不致有太多的支路过载, 各支路电流限值增加到原来的 1.4 倍, 并将其中的支路 15 及 36 的电流限制分别降低为 0.34 及

0.22。发电机有功出力极限(无功出力极限取文献[21]的值)、发电机参与阻塞管理报价如表 1、2 所示。参与实时市场预防及校正控制的节点可中断负荷报价如表 3 所示,为了简化起见取 $C_{Di}^{pdown} = C_{Di}^{cdown}$ 。

表 1 发电机有功出力极限
Tab. 1 Active power limits of generators

发电机 节点编号	最小有功 出力/MW	最大有功 出力/MW	发电机 节点编号	最小有功 出力/MW	最大有功 出力/MW
2	15	90	11	10	30
5	10	42	13	10	30
8	15	57	—	—	—

表 2 发电机节点参与阻塞管理功率调整报价
Tab. 2 Price bids of power adjustment of generators
participating in congestion management

发电机节点号	功率增加调整报价/ \$(MW·h)	功率减小调整报价/ \$(MW·h)
2	14	13
5	13	12
8	12	11
11	12	11
13	13	12

表 3 参与预防及校正控制节点可中断负荷功率调整报价
Tab. 3 Price bids of power adjustment of interruptible
loads participating in preventive and corrective controls

负荷节点号	调整报价/ \$(MW·h)	负荷节点号	调整报价/ \$(MW·h)
12	23	23	24
17	23	24	24
19	24	26	23
20	24	29	21
21	21	30	23

3.2 预防控制后校正控制有解

3.2.1 预防控制

当前运行点潮流计算结果显示支路 15 及支路 36 的电流分别为 0.384(过载 12.9%)及 0.278(过载 26.3%)。利用连续潮流方法对故障进行扫描,最严重的 6 个故障及相应负荷裕度如表 4 所示(本文只考虑 $N-1$ 输电线路断线故障,不含使系统解列故障)。

可以看出系统存在 3 个静态电压失稳故障,有 2 个支路电流越限,因此需要进行预防控制。预防控制仿真过程中部分参数的取值如下: $u_i^{\min} = 0.9$ 、 $u_i^{\max} = 1.1$ 、 $H_1 = 0.4$ 、 $\lambda_{0\min} = 0.1$ 。

表 4 预防校正控制前最严重的 6 个故障的负荷裕度
Tab. 4 Loading margins of the most severe contingencies
before preventive/corrective controls

故障编号	故障(断线支路)	最大负荷裕度	排序
1	1-2	-0.100 6	1
2	2-5	-0.061 0	2
3	9-10	-0.040 1	3
4	1-3	0.026 5	4
5	3-4	0.033 6	5
6	6-7	0.047 9	6

预防控制阻塞管理得到的控制变量调整量如表 5 所示,根据表 5 的结果对控制变量进行更新得到系统新的当前运行点。正常状态时系统在新的当前运行点潮流结果显示支路 15 及 36 的电流分别为 0.32 及 0.20,支路电流越限消除,系统正常状态时的负荷裕度为大于 0.1。在新的当前运行点利用连续潮流方法对预想故障进行扫描,最严重的 6 个故障对应的负荷裕度如表 6 所示。从表 6 可以看出预防控制前的所有失稳故障的潮流全部恢复,其中失稳故障 2、3 还具有了一定的负荷裕度,至此预防控制目标已完成。

表 5 预防控制阻塞管理节点功率调整结果
Tab. 5 Nodal power adjustment results of preventive
control congestion management

功率调整 节点及类型	功率调整量/ MW	功率调整 节点及类型	功率调整量/ MW
2(ΔP_{G2}^{pup})	1.23	21(ΔP_{D21}^{pdown})	5.09
5(ΔP_{G5}^{pup})	3.80	26(ΔP_{D26}^{pdown})	1.69
8(ΔP_{G8}^{pup})	2.82	29(ΔP_{D29}^{pdown})	1.34
11(ΔP_{G11}^{pup})	2.17	30(ΔP_{D30}^{pdown})	5.94
13(ΔP_{G13}^{pup})	3.60	—	—

表 6 预防控制后最严重的 6 个故障及负荷裕度
Tab. 6 Loading margins of the most severe contingencies
after preventive control

故障编号	断线支路	负荷裕度	故障编号	断线支路	负荷裕度
1	1-2	0.000 0	6	6-7	0.083 2
2	2-5	0.008 9	4	1-3	0.136 1
3	9-10	0.059 3	5	3-4	0.144 8

3.2.2 校正控制

校正控制阶段取: $\Delta P_{Gi}^{up\max} = \Delta P_{Gi}^{down\max} = 2 \text{ MW}$, $H_2 = 0.2$, $\lambda_{\gamma\min} = 0.06$ 。根据仿真结果,一些预想故障实际发生后系统需要校正控制,如 1-2、2-5 及 9-10 等支路断线故障时支路 15 及 36 电流越限,而且系统在这些故障条件下的负荷裕度小于最小负荷裕度要求,因此需要针对这些故障进行校正控制。

由于需要进行校正控制的预想故障数量较多,本文仅以 2-5 断线故障为例进行校正控制。预防控制后当发生 2-5 断线故障时,支路 15 的电流为 0.367(过载 7.9%),根据表 6 负荷裕度小于最小负荷裕度要求。对 2-5 断线故障进行校正控制,校正控制得到的节点功率调整结果如表 7 所示。

根据表 7 对控制变量进行更新,得到系统新的当前运行点。在新运行点处潮流结果显示 2-5 断线故障后支路 15 的电流为 0.318,负荷裕度为 0.06,满足校正控制要求。

表 7 2-5 断线故障校正控制节点功率调整结果
Tab. 7 Nodal Power adjustment results of corrective control for 2-5 line outage

功率调整 节点及类型	功率调整量/ MW	功率调整 节点及类型	功率调整量/ MW
2(ΔP_{G2}^{cup})	2.00	21(ΔP_{D21}^{down})	4.90
17(ΔP_{D17}^{down})	2.52	24(ΔP_{D24}^{down})	2.44
19(ΔP_{D19}^{down})	2.24	30(ΔP_{D30}^{down})	1.15

3.3 预防控制后校正控制无解

在 3.2.1 节中的预防控制后, 仍然对校正控制故障集中的故障分别进行校正控制, 但校正控制阶段的发电机爬升约束 $\Delta P_{Gi}^{up\max}$ 和 $\Delta P_{Gi}^{down\max}$ 都降低为 1 MW, 节点可中断负荷在校正控制阶段最大减负荷比率 H_2 降低为 0.15。经过仿真发现当发生 1-2、2-5 及 9-10 断线故障后校正控制无解, 根据图 1 的算法流程, 需要对预防及校正控制进行基于奔德斯分解的协调控制。分别构造与 1-2、2-5 及 9-10 断线故障相对应的子问题, 并以预防控制问题构造主问题。主问题及子问题交替迭代求解, 当 1-2、2-5 及 9-10 断线故障的校正控制有解($M_2^*=0$)时, 算法结束。

经过预防及校正协调控制后, 预防控制得到的新的节点功率调整结果如表 8 所示。

表 8 预防控制得到的节点功率调整结果
Tab. 8 Nodal Power adjustment results of preventive control after coordinated control

功率调整 节点及类型	功率调整量/ MW	功率调整 节点及类型	功率调整量/ MW
5(ΔP_{G5}^{pup})	3.80	26(ΔP_{D26}^{down})	1.96
21(ΔP_{D21}^{down})	9.80	29(ΔP_{D29}^{down})	1.34
24(ΔP_{D24}^{down})	1.42	30(ΔP_{D30}^{down})	5.50

根据表 8 对控制变量进行更新, 在新的运行点处潮流结果显示支路 15 及 36 的电流分别为 0.327 及 0.193, 故障扫描后最严重的 6 个故障及负荷裕度如表 9 所示。

表 9 预防控制后最严重的 6 个故障及负荷裕度
Tab. 9 Loading margins of the most severe contingencies after preventive control

故障编号	断线支路	负荷裕度	故障编号	断线支路	负荷裕度
1	1-2	0.000 0	3	9-10	0.093 1
2	2-5	0.016 0	4	1-3	0.152 5
6	6-7	0.083 7	5	3-4	0.161 8

在预防控制后, 校正控制故障集中所有故障的校正控制在发电机爬升约束及可中断负荷约束条件下都可以得到最优解。仿真结果显示 2-5 断线故障校正控制的最优解处发电机的爬升功率及节点可中断负荷都达到最大值, 而其他预想故障的校正控制也都能得到相应的最优解。

4 结论

本文提出了一种适用于实时市场的多故障静态安全稳定约束协调控制阻塞管理方法。建立的最优潮流模型考虑了运行约束与静态电压稳定约束的协调, 发挥了可中断负荷在预防控制及校正控制中的作用, 在奔德斯分解算法的基础上提出了预防及校正协调控制算法。该方法可以降低实时市场中阻塞管理的费用, 并尽可能减少由于系统故障引起的负荷意外中断, 因此在电力市场环境具有重要意义。

参考文献

[1] 马平, 蔡兴国, 于继来, 等. 基于最小不匹配函数的低压减载算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 27-31.
Ma Ping, Cai Xingguo, Yu Jilai, et al. A study on a undervoltage load shedding strategy based minimum mismatch function[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 27-31(in Chinese).

[2] 戴剑锋, 朱凌志, 周双喜, 等. 基于风险的低压减载策略问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 18-22.
Dai Jianfeng, Zhu Lingzhi, Zhou Shuangxi, et al. A risk-based study on under voltage load shedding schemes[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 18-22(in Chinese).

[3] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种在线电力系统静态稳定增强控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 7-12.
Zhao Jinquan, Chiang Hsiaocong, Zhang Boming. An on-line enhancement control algorithm for static stability in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 7-12(in Chinese).

[4] 傅旭, 王锡凡. 静态安全分析中的联动切负荷算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 82-86.
Fu Xu, Wang Xifan. New approach to load-shedding in static security analysis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 82-86(in Chinese).

[5] 蒋燕君, 张彦魁. 双边交易模式下电压稳定及热稳定预防控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 139-143.
Jiang Yanjun, Zhang Yankui. Preventive controls for voltage and thermal stability in bilateral transaction model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 139-143(in Chinese).

[6] 郭磊, 房大中. 实时电力市场中暂态约束下的阻塞管理模型研究[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 36-40.
Guo Lei, Fang Dazhong. A model for real-time congestion management with transient stability constraints[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 36-40(in Chinese).

[7] 王秀丽, 甘志, 雷兵, 等. 输电阻塞管理的灵敏度分析模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 10-13.
Wang Xiuli, Gan Zhi, Lei Bing, et al. Sensitivity analysis approach to transmission congestion management[J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26(4): 10-13(in Chinese).

[8] 刘昌, 姚建刚, 余虎, 等. 一种新型的电网输电阻塞管理模式[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 16-21.
Liu Chang, Yao Jiangang, Yu Hu, et al. Research of a new congestion management mode[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 16-21(in Chinese).

[9] 贺辉, 徐政. 考虑静态电压安全的输电阻塞管理[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 117-120.

- He Hui, Xu Zheng. Research on transmission congestion management considering static voltage security[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 117-120(in Chinese).
- [10] Singh H, Hao S, Papalexopoulos A. Transmission congestion management in competitive electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 672-68.
- [11] 王成山, 魏伟. 联营体模式下考虑静态电压稳定性约束的阻塞管理[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 53-57.
Wang Chengshan, Wei Wei. Congestion management with voltage stability considered in pool power market[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 53-57(in Chinese).
- [12] 王成山, 魏伟. 双边交易模式下考虑静态电压安全性的阻塞管理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 45-49.
Wang Chengshan, Wei Wei. Congestion management with voltage security considered in bilateral power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 45-49(in Chinese).
- [13] Conejo A J, Milano F, García-Bertrand R. Congestion management ensuring voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 357-364.
- [14] Amraee T, Ranjbar A M, Mozafari B, et al. An enhanced under-voltage load-shedding scheme to provide voltage stability[J]. Electric Power System Research, 2007(77): 1038-1046.
- [15] 李海英, 李渝曾, 张少华. 一种激励相容的输电阻塞管理模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 36-40.
Li Haiying, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. An incentive compatible model for transmission congestion management[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 36-40(in Chinese).
- [16] 毛伟明, 周明, 李庚银. 多时段下计及可中断负荷的电网输电阻塞管理[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 72-77.
Mao Weiming, Zhou Ming, Li Gengyin. Multi-period power transmission congestion management considering interruptible loads [J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 72-77(in Chinese).
- [17] 罗运虎, 薛禹胜, Gerard L Edwich, 等. 低电价与高赔偿 2 种可中断负荷的协调[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 17-20.
Luo Yunhu, Xue Yusheng, Edwich G L, et al. Coordination of low price interruptible load and high compensation interruptible load[J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(11): 17-20(in Chinese).
- [18] 郭瑞鹏, 吴浩, 韩祯祥, 等. 在线多预想故障静态电压崩溃预防控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 1-6.
Guo Ruipeng, Wu Hao, Han Zhenxiang, et al. Online multi-contingency preventive control to avoid static voltage collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 1-6(in Chinese).
- [19] Monticelli A, Pereira M V F, Granville S. Security-constrained optimal power flow with post-contingency corrective rescheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(1): 175-180.
- [20] Schlueter R A, Liu S, Alemadi N. Preventive and corrective open access system dispatch based on the voltage stability assessment and diagnosis[J]. Electric Power System Research, 2001(60): 17-28.
- [21] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 309-313.



邹晓松

收稿日期: 2009-03-30。

作者简介:

邹晓松(1965—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统安全经济运行、电力市场, zouxu@mail.xjtu.edu.cn;

罗先觉(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全经济运行、电力市场、电网规划优化。

(责任编辑 刘浩芳)