

一种新的考虑多个预想事故暂态稳定约束的最优化潮流模型

提出了以整个系统总期望成本为目标函数的最优化潮流模型。期望成本中包括系统正常运行时的煤耗成本和故障发生后所需付出的紧急控制措施的代价。模型中计入了预想事故的发生概率，将多个预想事故分为两个集合。一个集合的预想事故作为强制约束进行最优潮流计算，得出正常运行时的成本；另一个集合中的预想事故采用基于动态安全域的最优紧急控制模型，求取最优紧急控制措施代价。然后将这两部分成本按照其发生概率计入目标函数。10机39节点算例表明，该模型所得结果较传统的考虑多个暂态稳定约束的最优化潮流模型总成本减少了12%。

王海岩 张继阳/华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室

0 引言

随着电力工业的发展，现代电网的规模及复杂程度显著增加，电力系统运行点越来越接近其稳定极限，如何统一协调考虑系统运行的安全性与经济性成为日益迫切的问题^[1-2]。考虑暂态稳定约束的最优潮流（Optimal power flow constrained by Transient Stability, OTS）方法由于能够将系统的经济性以及动态安全性纳入到同一框架中分析，成为解决安全经济运行领域中诸多问题的有效工具，受到人们的广泛关注^[3]。

OTS是将系统的动态方程以及功角限制作为约束条件加入到最优潮流（Optimal Power Flow, OPF）中，这是一个包含微分-代数方程组的复杂优化问题。目前主要的求解方法有两类，一类是“直接法”，其思想是将动态方程差分化为一系列代数方程，并将之作为等式约束加入到OPF^[4-6]中。此种方

法在离散化时会带来一定的误差，且方程数较常规OPF问题显著增加，造成计算时间过长和收敛困难。另一类为“间接法”，其思想是利用约束转换技术将OTS问题转化为同规模的OPF问题^[7-8]，这种方法在优化过程中需求解大量的动态灵敏度方程以计算暂态稳定约束函数的雅克比矩阵，计算量较大。文献[9]将OTS分解为最优潮流和最优控制两个子问题进行求解，为求解OTS提供了新思路。实用动态安全域（PDSR）的研究成果使安全性定量分析成为可能，而且也包含暂态安全约束的优化问题提供了一种很好的约束形式^[11-15]。

在以往的多个暂态稳定约束的最优化潮流模型中，暂态稳定约束被当作强制约束计入最优潮流模型，而忽略了各个预想事故的发生概率。然而在电力大系统中，一段时间内的预想事故是很多的，将多个预想事故的暂态稳定约束作为强制约束进行最优潮流计算，往往使系统运行在不经济的运行点。文献[5]以一个计算实例指出，随着考虑的预想事故的增多，为了保证系统的暂态稳定性必然会牺牲系统的经济性。在实际系统中，当预想事故发生时，必然会采用控制措施对系统进行控制。

文献[10]提出了一种考虑预想事故发生概率的最优潮流模型，引入系统期望运行成本的概念，综合考虑了系统正常运行时的煤耗成本和故障发生时所付出的发电机和负荷功率再分配的成本。然而在该模型中，没有考虑系统的暂态稳



王海岩/硕士研究生

关键词/Keywords

电力系统·
最优化潮流·
暂态稳定约束·
实用动态安全域·
紧急控制·

定性和紧急控制措施的代价。本文借鉴了其系统期望运行成本的概念,提出了一种考虑多个预想事故暂态稳定性的最优化潮流模型。在模型中综合考虑了预想事故的发生概率和故障后所采用的紧急控制措施代价,可使系统运行在一个较经济的运行点。

1 实用动态安全域

1.1 实用动态安全域的概念

动态安全域 $\Omega_d(i, j, \tau)$ 是注入空间上的集合,当且仅当事故前网络结构 i 中的注入功率向量 $\mathbf{y}$ 处于该集合内时,在发生了持续时间为 τ 的事故之后,网络结构变为 j 时,系统不会失去暂态稳定。保证暂态功角稳定性的DSR边界,可由注入功率空间上描述各节点注入功率上、下限的垂直于坐标轴的超平面和描述暂态稳定性临界点的一个或几个超平面近似表示。用超平面近似表示DSR边界,称为实用动态安全域(Practical Dynamic Security Region, PDSR)。对于既定事故,PDSR是唯一确定的。对于含有 n 个节点的网络,对应某一失稳模态的PDSR边界的超平面方程表示为

$$\mathbf{a}^T \mathbf{y} = 1 \quad (1)$$

式中, $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ 为所求得的超平面方程系数向量; $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 为保证系统暂态稳定的临界有功功率注入向量。

在已知超平面形式的安全域边界之后,暂态稳定约束表示为注入功率线性组合的不等式,即

$$\mathbf{a}^T \mathbf{y} > 1 \quad \text{或者} \quad \mathbf{a}^T \mathbf{y} < 1 \quad (2)$$

图1为New England 10机39节点系统对应某一故障的PDSR的二维投影。图1中, $\partial\Omega_a$ 为暂态稳定的临界线, $\mathbf{y}_0$ 位于PDSR外部,故障发生后系统暂态失稳;点 $\mathbf{y}$ 位于动态安全域内部,发生故障后系统暂态稳定。

1.2 基于实用动态安全域的最优紧急措施

文献[12]研究了计及紧急控制措施 e 的扩展动态安全域,并提出了一种电力系统最优暂态稳定紧急控制新方法。图1中,当计及紧急控制措施 e 后,动态安全域边界为图1中的斜虚线($\partial\Omega_a$ 扩

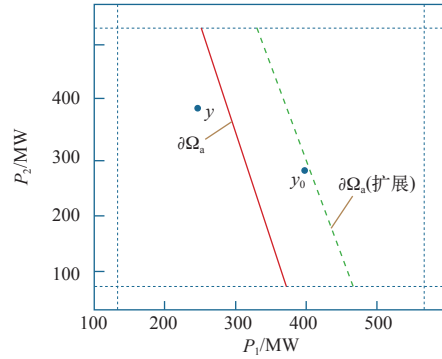


图1 PDSR在二维平面上的断面图

展)所示。运行点 $\mathbf{y}_0$ 处于扩展动态安全域内部即表示当发生预想事故后,采用紧急控制措施 e 后,系统保持暂态稳定。利用紧急控制措施所引起的实用动态安全域临界面沿其外法线方向的迁移距离来表示紧急控制的有效性。在此基础上,将控制措施量化为一个成本指标,建立了最优暂态稳定紧急控制的数学模型,即

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{e}_k \in E} C(e_k) = \sum_{n \in G} C_{sgn} + \sum_{m \in L} C_{slm} \\ \text{s.t. } \mathbf{y} \in \Omega_d(\gamma, e_k), \quad M_s \geq \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

式中, E 为可供选择的紧急控制措施集; $C(e_k)$ 为控制措施 e_k 的成本; $\mathbf{y}$ 为系统当前注入功率向量; $\Omega_d(\gamma, e_k)$ 为发生事故 γ 时计及紧急控制措施 $e_k \in E$ 的扩展实用动态安全域; M_s 为稳定裕度,定义为 $M_s = 1 - \mathbf{a}^T \mathbf{y}$, $\mathbf{y}$ 在安全域内时 M_s 为正值,反之为负值; ε 为设定的最小稳定裕度值。

对于图1中的 $\mathbf{y}_0$,利用该优化模型可以求出保证系统暂态稳定的最优紧急控制措施及其代价。

2 一种新的最优潮流模型

2.1 期望成本

在考虑系统的暂态稳定约束后,本文定义的期望运行成本主要包括系统正常运行时的煤耗成本以及故障发生后进行紧急控制措施保持系统稳定所付出的代价。如下式

$$C = \pi^0 C^0 + \sum_{k=1}^K \pi^k C_e^k \quad (4)$$

期望成本包括两部分。第一部分称为故障前期望运行成本, C^0 为正常运行时的煤耗,为发电机

有功出力 P_{Gi} 的二次函数；第二部分称为期望紧急控制正本， C^k 为发生第 k 种故障时，由式(3)求取的最优紧急控制措施代价， π^k 为预想事故的发生概率， $\pi^0 = 1 - \sum_{k=1}^K \pi^k$ 。

期望成本中考虑了预想事故的发生概率和紧急控制措施的代价，能够较好地反应一段时间内系统运行的总成本。这既避免了将所有预想事故都纳入强制约束计算 C^0 时，使系统运行在不经济的运行点的缺点，又能使系统运行在较安全的状态下。

期望成本中考虑了预想事故的发生概率和紧急控制措施的代价，能够较好地反应一段时间内系统运行的总成本。这既避免了将所有预想事故都纳入强制约束计算 C^0 时，使系统运行在不经济的运行点的缺点，又能使系统运行在较安全的状态下。

2.2 最优潮流数学模型

(1) 目标函数

$$\min \left\{ \pi^0 C^0 + \sum_{k=1}^K \pi^k C^k \right\} \quad (5)$$

其中

$$C^0 = \sum_{i \in G} C_{Gi}(P_{Gi}^0) \quad (6)$$

$$C_{Gi} = a_{Gi} P_{Gi}^2 + b_{Gi} P_{Gi} + c_{Gi} \quad (7)$$

(2) 等式约束

等式约束为节点注入潮流平衡方程，即

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) \end{cases} \quad i \in S_n \quad (8)$$

(3) 不等式约束

运行约束为

$$\begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \bar{Q}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i & i \in S_n \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} & i \in S_{cl} \end{cases} \quad (9)$$

电力系统在一定时间内的预想事故是很多的，将其全部计入强制约束，往往使系统运行在不经济的运行点，所以从预想事故中选出发生概率大，发生后紧急控制措施代价大的计入强制约束计算 C^0 ，而剩下的预想事故由紧急控制措施控制，反映在目标函数中的为紧急控制代价 C^k 。

将预想事故分为两个集合，集合 Γ_o 、 Γ_e 。 Γ_o 包括系统发生该事故后能够保持暂态稳定，而不需要再采用紧急控制措施的预想事故。 Γ_e 包括系统发生该事故后，使系统稳定的控制措施。暂态稳定约束为

$$y \in \left[\bigcap_{\forall \gamma_i \in \Gamma_o} \Omega_d(\gamma_i) \right] \cap \left[\bigcap_{\forall \gamma_i \in \Gamma_e} \Omega_d(\gamma_i, e_j) \right] \quad (10)$$

式中， y 为系统的功率注入向量； $\Omega_d(\gamma_i)$ 为发生故障 γ_i 时的实用动态安全域； $\Omega_d(\gamma_i, e_j)$ 为发生故障 γ_i 而采用紧急控制措施 e_j 时的扩展动态安全域。

3 求解策略

将预想事故集分解为 Γ_o 、 Γ_e 。这样原优化问题可以分为最优潮流和最优控制两个子问题的求解。第一步为将 Γ_o 的预想事故作为强制约束，计算最优化潮流。第二步计算对 Γ_e 中预想事故的最优紧急控制措施。当考虑 n 个预想事故时， Γ_o 、 Γ_e 将有 2^n 种不同的组合，计算量很大。本文采用文献[14]中提出的“积极约束松弛法”。其基本思想为：首先让 Γ_o 包括全部预想事故作为强制约束，计算最优化潮流（本文用内点法计算），得到系统的一个运行点。此时紧急控制期望成本为零；再将问题中部分（或全部）积极约束（新的运行点如果在某实用动态安全域的边界上，则该事故的动态安全域不等式约束就是积极约束）所对应的故障从 Γ_o 中松弛出来并入 Γ_e ，按照此时的 Γ_o 、 Γ_e 重新进行新约束下的优化，并观察总成本的变化，如果总成本变大，则上一次优化得到的结果就是最优解；如果总成本变小，则仍需将该步中的部分（或全部）积极约束所对应的故障也并入 Γ_e ，继续进行新的内层优化。如此反复进行，直至总成本不再减小为止。

4 算例分析

以新英格兰10-39系统算例验证所提模型，系统结构如图2所示。

为了紧急控制实施的方便，每个发电机节点上的机组等效为5台同型号的发电机。选择31号母线发电机节点为平衡节点，其所接发电机不参与

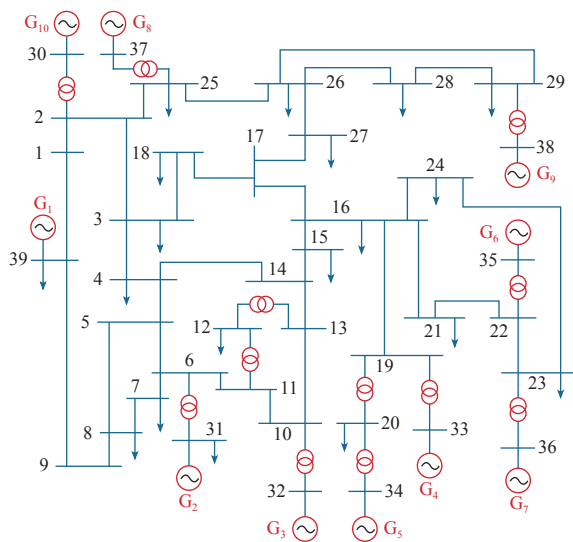


图2 新英格兰10机39节点示例系统

调度。对预想事故求取最优紧急控制措施时，最小稳定裕度 ε 设定为0.015。各节点上发电机的关机和起动成本根据发电机容量设为不同的常数。假定预想事故均为线路50%处发生三相短路，如表1所示。

表1 预想事故及其发生概率

预想事故编号	故障线路	发生概率($\times 10^{-3}$)
1	1—39	0.200
2	2—3	0.121
3	2—25	0.069
4	3—4	0.170
5	3—18	0.107
6	4—5	0.315 6
7	4—14	0.104
8	5—6	0.021
9	5—8	0.090
10	6—7	0.074

应用本文的优化方法，经过5次循环迭代，得到了最终的综合控制方案。优化过程中的各成本变化如表2所示。随着迭代次数的增加， Γ_c 中的预想事故数不断增加， Γ_o 中的预想事故数相应地就逐渐减少，因此迭代过程中期望运行成本逐渐减小，紧急控制成本逐渐增大。第5次迭代得到最优解，此时 Γ_o 中有5个预想事故， Γ_c 中有5个预想事故。

当把10个预想事故当作强制约束计入优化潮流模型时，整个系统的期望成本为13 568元，此

表2 优化过程中各成本变化

迭代 步骤	Γ_c	故障前期望 运行成本/元	期望紧急 控制成本/元	总期望 成本/元
1	ϕ	135 68	0	13 568
2	{4, 5}	12 541	321	12 862
3	{3, 4, 5}	11 923	422	12 345
4	{2, 3, 4, 5}	11 524	503	12 027
5	{2, 3, 4, 5, 7}	11 323	596	11 919

时紧急控制成本为0。通过优化求解，最终预想事故{2,3,4,5,7}通过事故后紧急控制措施确保系统稳定，系统总的期望运行成本共减少了12%。优化前与优化后系统运行点发电机出力对比如图3所示。

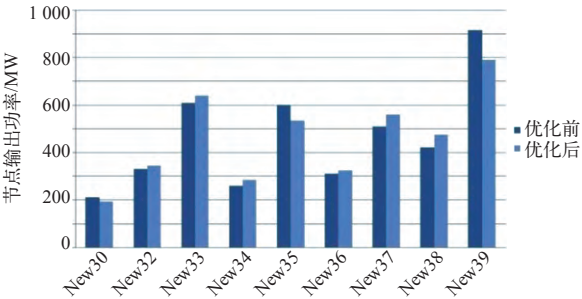


图3 优化前与优化后系统运行点发电机出力对比

5 结束语

基于实用动态安全域的成果，提出了以整个系统期望成本最小化为目标的最优化潮流模型。在该模型中综合考虑了系统正常运行时的成本和预想事故发生后的控制措施的成本。按照预想事故发生概率，将这两部分成本计入整个系统的期望成本，较好地反映了一段时间内整个系统的成本。将整个预想事故集合分为两个集合，一个集合的预想事故作为强制约束，计算最优潮流；另一集合的预想事故在事故后采用紧急控制措施，以保证系统稳定。并采用了“积极约束松弛法”的求解策略求取最优解。10机39节点算例表明，所提模型的系统总的期望运行成本较传统的考虑多个事故暂态稳定性的最优化潮流模型共减少了12%，能够使系统达到经济性和安全性最优的运行点。

参考文献

[1] 汤涌，电力系统安全稳定综合防御体系框架[J].

- 电网技术, 2012, 36 (8) : 1-5.
- [2] 李传栋, 杨金刚, 陈家荣. 暂态稳定约束下的最优潮流 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (6) : 45-50.
- [3] 叶承晋, 黄民翔. 考虑暂态稳定性的多目标最优潮流 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (10) : 137-144.
- [4] Deqiang Gan, Robert J Thomas, Ray D Zimmerman. Stability-constrained optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 15 (2) : 535-540.
- [5] 袁越, 久保川淳司, 佐佐木博司, 等. 基于内点法的含暂态稳定约束的最优潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (13) : 14-19.
- [6] Quanyuan Jiang, Guangchao Geng. A reduced-space interior point method for stability constrained optimal power flow transient [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (3) : 1232-1240.
- [7] Luonan Chen, Yasuyuki Tada, Hiroshi Okamoto, et al. Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2001, 48 (3) : 327-339.
- [8] Xia Y, Chan K W, Liu M. Direct nonlinear primal-dual interior point method for transient stability constrained optimal power flow [C]. IEEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution, 2005, 152 (1) : 11-16.
- [9] 孙景强, 房大中, 锤德成. 暂态稳定约束下的最优潮流 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (12) : 12-17.
- [10] John Conder, Thomas W, Parnjit Damrongkulkarnjorn. Optimal power flow with expected security costs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (2) : 541-547.
- [11] 余贻鑫. 电力系统安全域方法研究述评 [J]. 天津大学学报, 2008, 41 (6) : 635-646.
- [12] 余贻鑫, 刘辉, 曾沅. 基于实用动态安全域的最优暂态稳定紧急控制 [J]. 中国科学, 2004, 34 (5) : 556-563.
- [13] 刘辉, 余贻鑫. 基于实用动态安全域的电力系统安全性综合控制 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (20) : 31-36.
- [14] 余贻鑫, 赵义术, 刘辉, 等. 基于实用动态安全域的电力系统安全成本优化 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6) : 13-18.
- [15] 刘怀东, 石世锋, 高天亮, 等. 基于动态安全域的电力系统安全概率评估模型 [J]. 中国电力, 2012, 45 (5) : 1-5.

(收稿日期: 2015-12-25) EA



典藏技术 革新应用

专业专注

时刻关注并推动中国电气技术的发展



《电气应用》是一本拥有光荣发展历程的全国优秀科技期刊。

自 1982 年创刊至今, 已走过了 34 年艰苦创业、改革发展的光辉历程。其所荣获的“全国优秀期刊、中国期刊方阵‘双奖期刊’和国家期刊奖‘百种重点期刊’、中文核心期刊”等诸多荣誉见证了编辑们的专业与勤奋, 也博得了广大读者和业内专家的支持与厚爱, 在众多电工类专业技术期刊中颇具影响力。

电气应用