

# 考虑调整变化量和变步长的暂态稳定约束最优潮流模型

夏小琴, 徐伟

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 为了满足电网事故后运行方式的快速调整需求, 本文提出了一种新的暂态稳定约束最优潮流(TSCOPF)模型, 以系统调整变化量最小为目标, 并采用了区分故障中和故障切除后两阶段的积分步长微调策略。该模型的系统调整变化量与系统失稳程度密切相关, 解决了传统 TSCOPF 调整量过大的问题。两阶段积分步长微调策略使得刚好整数步时到达故障切除时刻和仿真结束时刻, 实现了关键时间节点的准确仿真。采用了原始-对偶内点法求解该模型。IEEE-9、NE-39 及 IEEE-118 3 个测试系统的计算结果表明, 所提方法利于调度员快速处理事故, 提高了 TSCOPF 的实用化水平。

**关键词:** 最优潮流; 暂态稳定; 调整变化量; 变步长

**中图分类号:** TM71

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2018)06-0115-05

## 0 引言

随着特高压交直流互联、新能源接入及电力市场的发展, 电力系统的运行方式越来越接近稳定极限, 安全稳定问题日益突出。常规的最优潮流(optimal power flow, OPF)难以保证电网运行的动态安全性<sup>[1]</sup>。为了解决这一问题, 暂态稳定约束最优潮流(transient stability constrained optimal power flow, TSCOPF)应运而生, 受到了研究者的广泛关注<sup>[2-16]</sup>。

与常规 OPF 相比, TSCOPF 的难点在于对微分转子运动方程的处理。目前主要有时域仿真法<sup>[2-8]</sup>、约束转换法<sup>[9-10]</sup>、轨迹灵敏度法<sup>[11-12]</sup>、能量函数法<sup>[13]</sup>等。时域仿真法将微分方程差分化为一系列的代数方程, 其优点是原理清晰, 可采用任意复杂的模型, 但会导致计算规模庞大的问题。约束转换法中间计算量大, 对模型敏感。轨迹灵敏度法在大扰动下准确性不高, 甚至会影响计算收敛性。能量函数法的精确性同样比时域仿真法的精确性差。针对时域仿真法计算速度慢的问题, 研究者们提出了减空间技术<sup>[5]</sup>、大步长数值方法<sup>[6-7]</sup>、并行计算技术<sup>[15]</sup>等有效手段。故障切除时刻网络参数发生突变, 是暂态稳定分析的关键时间节点。若积分步长不能在整数步时到达故障切除时刻会影响 TSCOPF 计算结果的准确性。

大部分文献中的 TSCOPF 目标函数取系统网损最小<sup>[4,6-7]</sup>或发电燃料总费用最小<sup>[3,8,11-16]</sup>, 文献[5]同时取系统网损最小和发电燃料总费用最小。虽

然以系统网损最小或发电燃料总费用最小的目标函数可以使系统方式调整到经济最优, 但通常调整几乎全部的控制措施, 调整量过大, 无法满足电网事故后运行方式的快速调整需求。

基于此, 本文提出一种新的暂态稳定约束最优潮流模型, 取系统总调整变化量最小为目标, 通过尽可能少的调整快速地将系统调整到安全稳定状态, 并引入文献[16]的变步长策略, 以故障切除时刻为时间节点微调两阶段的积分步长, 实现对故障切除时刻和仿真结束时刻的精确取点。采用原始-对偶内点法对该模型进行求解。IEEE-9、NE-39 及 IEEE-118 3 个测试系统的计算结果验证了所提方法的有效性。

## 1 目标函数选取

优化问题的数学模型可归纳如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & h(x) = 0 \\ & \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $x \in \mathbf{R}^n$  为变量;  $f(x): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$  为目标函数;  $h(x): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$  为等式约束;  $g(x): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^c$  为不等式约束;  $\underline{g}, \bar{g}$  分别为不等式约束的上下限。

文献[3,8,11,13-14,16]的目标函数如式(2)所示; 文献[4,6]的目标函数如式(3)所示; 文献[5]分别考虑了如式(2)和式(4)所示的目标函数; 文献[7]考虑了如式(5)所示的目标函数。

$$f(x) = \sum_{i \in S_G} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (2)$$

$$f(x) = \sum_{i \in S_G} P_{Gi} \quad (3)$$

$$f(x) = \sum (P_{ij} + P_{ji}) \quad (4)$$

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-08-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904500)

$$f(x) = \sum_{i \in S_G} P_{Gi} - \sum_{i \in S_N} P_{Di} \quad (5)$$

式中:  $S_G$  为发电机节点集合;  $S_N$  为所有节点集合;  $P_{Gi}$  为发电机  $i$  的发电机有功功率;  $P_{Di}$  为节点  $i$  的有功负荷;  $P_{ij}(P_{ji})$  为节点  $i(j)$  节至节点  $j(i)$  的有功功率;  $a_i, b_i$  和  $c_i$  分别为发电机  $i$  的费用系数。

以系统网损最小或发电燃料总费用最小的目标函数对原方式的调整量过大。本文取系统总调整变化量最小作为 TSCOPF 的目标函数, 如式(6)所示。

$$f(x) = \sum_{i \in S_G} |P_{Gi} - P_{Gi}^0| \quad (6)$$

式中:  $P_{Gi}^0$  为原方式发电机  $i$  的有功功率。

将式(6)转化为式(7):

$$f(x) = \sum_{i \in S_G} (\lambda_{Gi}^+ + \lambda_{Gi}^-) \quad (7)$$

式中:  $\lambda_{Gi}^+$  为发电机  $i$  的有功上调偏差量;  $\lambda_{Gi}^-$  为发电机  $i$  的有功下调偏差量。

发电机有功上调偏差变量  $\lambda_{Gi}^+$  和下调偏差变量  $\lambda_{Gi}^-$  的性质如式(8)所示。

$$\begin{cases} \lambda_{Gi}^+ - \lambda_{Gi}^- = P_{Gi} - P_{Gi}^0 \\ \lambda_{Gi}^+ \geq 0 \\ \lambda_{Gi}^- \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

## 2 两阶段步长微调策略

文献[16]采用二分法计算暂态稳定临界切除时间时, 根据一定的步长更新策略使得刚好整数步时到达搜索区间的中点位置。本文引入该步长更新策略, 分别微调故障中和故障切除后两阶段的积分步长, 表达式如下:

$$\Delta t = F(t_c) = \begin{cases} t_c / \lceil t_c / \Delta t_0 \rceil & t \leq t_c \\ (T - t_c) / \lceil (T - t_c) / \Delta t_0 \rceil & t > t_c \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $t_c$  为故障切除时刻;  $\Delta t_0$  为数值求解方法所需的积分步长, 例如, 目前公认隐式梯形法所需的积分步长为 0.01 s;  $T$  为仿真结束时刻; 符号  $\lceil x \rceil$  表示上取整, 即取不小于  $x$  的最小整数。

## 3 TSCOPF 模型

本文考虑经典模型, 发电机用暂态电抗  $X'_{di}$  和暂态电抗后电势  $E'$  相串联表示, 且设  $E'$  恒定; 发电机输入的机械功率  $P_m$  恒定; 负荷用恒定阻抗表示。采用经典的隐式梯形法将微分的转子运动方程差分为一系列的代数方程。建立的 TSCOPF 模型描述如下:

$$\min \sum_{i \in S_G} (\lambda_{Gi}^+ + \lambda_{Gi}^-)$$

s.t.

$$\begin{cases} V_i \sum_{j \in S_N} V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) + P_{Di} - P_{Gi} = 0 \\ V_i \sum_{j \in S_N} V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) + Q_{Di} - Q_{Ri} = 0 \\ \delta_i^t - \delta_i^{t-1} - \frac{\Delta t}{2} \omega_N (\omega_i^t - \omega_0 + \omega_i^{t-1} - \omega_0) = 0 \\ \omega_i^t - \omega_i^{t-1} - \frac{\Delta t}{2M_i} (P_{Gi} - P_{ei}^t + P_{Gi} - P_{ei}^{t-1}) = 0 \\ E_i V_i \sin(\delta_i^0 - \theta_i) - P_{Gi} X'_{di} = 0 \\ V_i^2 - E_i V_i \cos(\delta_i^0 - \theta_i) + Q_{Gi} X'_{di} = 0 \\ \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} & i \in S_R \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i & i \in S_N \\ \underline{\delta} \leq \delta_i^0 - \delta_{COI}^0 \leq \bar{\delta} \\ \underline{\delta} \leq \delta_i^t - \delta_{COI}^t \leq \bar{\delta} \\ \lambda_{Gi}^+ - \lambda_{Gi}^- = P_{Gi} - P_{Gi}^0 \\ \lambda_{Gi}^+ \geq 0 \\ \lambda_{Gi}^- \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{ei}^t = E_i \sum_{j \in S_G} E_j Y_{ej} \cos(\delta_i^t - \delta_j^t - \alpha_{ej}) \quad (10a)$$

$$\begin{cases} \delta_{COI}^0 = \sum_{i \in S_G} M_i \delta_i^0 / \sum_{i \in S_G} M_i \\ \delta_{COI}^t = \sum_{i \in S_G} M_i \delta_i^t / \sum_{i \in S_G} M_i \end{cases} \quad (10b)$$

式中:  $t \in S_T$ ,  $S_T$  为积分时段集合;  $S_R$  为无功源点集合;  $Q_{Ri}$ ,  $Q_{Di}$  分别为节点  $i$  处无功源输出功率、无功负荷;  $V_i$ ,  $\theta_i$  分别为节点  $i$  的电压幅值、相角;  $Y_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$  分别为节点导纳矩阵幅值、相角;  $Y_{ej}$ ,  $\alpha_{ej}$  分别为保留发电机节点的既约导纳矩阵的幅值、相角;  $P_{ei}^t$ ,  $\delta_i^t$ ,  $\omega_i^t$  分别为发电机  $i$  在  $t$  时刻的电磁功率、转子角度和角速度;  $\Delta t$  为积分步长, 计算如式(9)所示;  $M_i$  为发电机  $i$  的转动惯量;  $X'_{di}$  为发电机  $i$  的暂态电抗;  $\underline{P}_{Gi}$ ,  $\bar{P}_{Gi}$ ,  $\underline{Q}_{Ri}$ ,  $\bar{Q}_{Ri}$ ,  $\underline{V}_i$ ,  $\bar{V}_i$  分别为有功源出力上下限、无功源出力上下限和节点电压幅值上下限;  $\underline{\delta}$ ,  $\bar{\delta}$  分别为发电机转子相对摇摆角度上下限, 取为  $\pm 100^\circ$ ;  $\delta_{COI}^0$  为稳态时惯性中心角度;  $\delta_{COI}^t$  为预想故障下各时段的惯性中心角度;  $\omega_N$  为速角度基准值。

原始-对偶内点法具有计算速度快、收敛性好

等优点,在电力系统中得到了很好的应用<sup>[3-7,17]</sup>。采用原始-对偶内点法求解上述模型,具体求解步骤参见文献[18]。

#### 4 测试结果与讨论

本节以表1所示3个测试系统为例验证所提方法的有效性。目前只考虑单重故障。故障节点的故障类型为三相短路。计算程序在64位Matlab R2016b上实现,计算机配置为Intel(R)Core(TM)i7-2640M 2.8 GHz,4 GB内存。

表1 测试系统概况

Tab.1 Overview of the test systems

测试系统	发电机数	故障线路	短路节点	仿真时长/s	故障切除时刻/s
IEEE-9	3	3-6	3	2	0.517
NE-39	10	28-29	28	2	0.127
IEEE-118	16	5-11	5	2	0.338

IEEE-9系统的两阶段步长取为0.009942s,0.009953s,NE-39系统两阶段步长取0.009769s,0.009963s,IEEE-118系统的两阶段步长取为0.009941s,0.009952s,实现了对故障切除时刻和仿真结束时刻的精确取点。

图1为各测试系统的互补间隙随迭代次数的变化曲线。从图1可以看出,各测试系统的对偶间隙单调收敛至零,算法具有良好的收敛性。

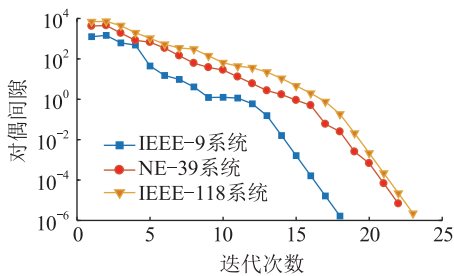


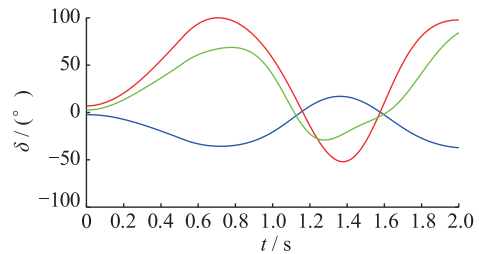
图1 互补间隙随迭代次数的变化曲线

Fig.1 Variation curves of complementary gap with iteration times

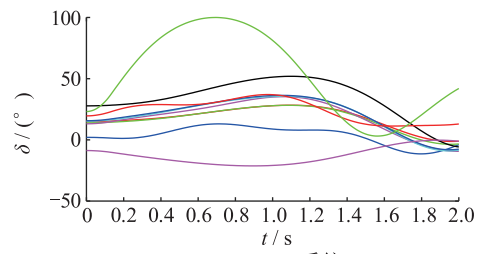
各测试系统的调整后发电机转子摇摆曲线如图2所示。可见,所有发电机的转子相对角度均在 $-100^\circ$ 至 $100^\circ$ 范围内,满足了在仿真时间内各发电机不失稳的要求。

各测试系统在式(3)所示网损最小目标和本文目标下的调整量分别列于表2至表4。

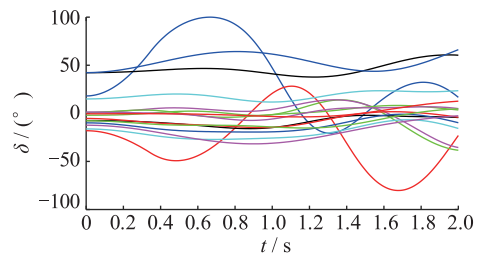
可见,传统网损最小目标调整量在各故障切除时刻下相同,故障切除时刻较小时调整过大;本文目标调整量与系统失稳程度密切相关,避免了对原方式的过调。



(a) IEEE-9系统



(b) NE-39系统



(c) IEEE-118系统

图2 调整后转子摇摆曲线

Fig. Swing curves after adjustment

表2 IEEE-9系统调整量比较

Tab.2 Power adjustment comparison of IEEE-9 system

序号	故障切除时刻/s	网损最小目标调整量/MW	本文目标调整量/MW
1	0.50	99.76	0
2	0.51	99.76	0
3	0.52	99.76	1.82
4	0.53	99.76	4.01
5	0.54	99.76	6.14
6	0.55	99.76	8.17
7	0.56	99.76	10.13

表3 NE-39系统调整量比较

Tab.3 Power adjustment comparison of NE-39 system

序号	故障切除时刻/s	网损最小目标调整量/MW	本文目标调整量/MW
1	0.10	1 323.86	0
2	0.11	1 323.86	0
3	0.12	1 323.86	0
4	0.13	1 323.86	1.13
5	0.14	1 323.86	4.37
6	0.15	1 323.86	22.31
7	0.16	1 323.86	58.91

表4 IEEE-118 系统调整量比较  
Tab.4 Power adjustment comparison of IEEE-118 system

序号	故障切除时刻/s	网损最小目标调整量/MW	本文目标调整量/MW
1	0.32	2 007.00	0
2	0.33	2 007.00	0
3	0.34	2 007.00	2.37
4	0.35	2 007.00	12.42
5	0.36	2 007.00	27.05
6	0.37	2 007.00	41.43
7	0.38	2 007.00	55.32

以 NE-39 系统 0.15 s 切除故障为例对上述两模型的有功功率网损及调整量进行比较。系统原有有功功率网损为 45.52 MW,传统网损最小目标和本文目标调整后的有功功率网损分别为 31.56 MW 和 54.87 MW。传统网损最小目标减小了系统有功网损,本文目标的系统有功网损比原网损稍大。两模型下各发电机的调整信息如表 5 所示,传统网损最小目标下系统内可调发电机全部参与调整,而本文目标下只调整了图 3 所示的 2 台关键发电机。相比传统网损最小目标,本文目标虽然网损较大,但总发电机有功调整量和调整台数均明显减小,便于对系统进行快速的运行方式调整,利于电网事故后的快速恢复。

表5 NE-39 系统发电机有功调整量  
Tab.5 Generator regulation of NE-39 system

调整节点	网损最小目标调整量/MW	本文目标调整量/MW
BUS-30	-50.00	0
BUS-31	223.98	0
BUS-32	50.28	0
BUS-33	-126.77	0
BUS-34	13.88	0
BUS-35	150.00	0
BUS-36	-151.16	0
BUS-37	-123.03	0
BUS-38	-217.95	-6.48
BUS-39	216.82	15.83

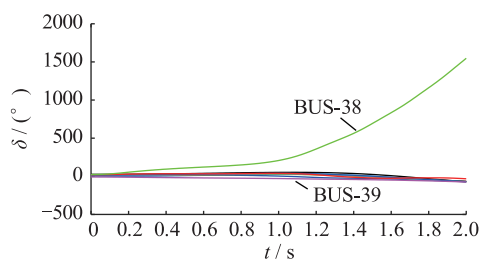


图3 NE-39 系统初始转子摇摆曲线

Fig.3 Original swing curves of NE-39 system

## 5 结语

本文提出了一种新的考虑调整变化量和变步长的 TSCOPF 模型。IEEE-9、NE-39 及 IEEE-118 3 个测试系统的验证结果表明:(1) 两阶段变步长时域仿真实现了对故障切除时刻和仿真结束时刻的精确取值;(2) 以调整变化量最小为目标 TSCOPF 模型得出的目标调整与系统失稳程度密切相关,对运行方式的修正量小于传统模型,便于对电网事故后运行方式进行快速调整,提高了 TSCOPF 的实用化水平。

### 参考文献:

- [1] 薛禹胜. 电力系统暂态稳定快速分析和控制的现状和发展[J]. 电力系统自动化,1995,19(1):6-13.  
XUE Yusheng. Fast assessment and control of transient stability-status and development [J]. Automation of Electric Power System,1995,19(1):6-13.
- [2] GAN D, THOMAS R J, ZIMMERMAN R D. Stability-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000,15(2):535-540.
- [3] 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.  
YUAN Yue, KUBOKAWA J, SASAKI H, et al. Interior point method based optimal power flow with transient stability constraints[J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26(13):14-19.
- [4] 韦化, 阳育德, 李啸骢. 多预想故障暂态稳定约束最优潮流[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):91-96.  
WEI Hua, YANG Yude, LI Xiacong. Optimal power flow with multi-contingencies transient stability constrained[J]. Proceedings of CSEE,2004,24(10):91-96.
- [5] JIANG Q Y, GENG G C. A reduced-space interior point method for transient stability constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(3):1232-1240.
- [6] 夏小琴, 韦化. 基于三步隐式 Adams 法的暂态稳定约束最优潮流[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):55-61.  
XIA Xiaoqin, WEI Hua. Transient stability constrained optimal power flow model based on three-step implicit Adams method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(11):55-61.
- [7] 刘鹏飞, 韦化, 李滨, 等. 基于哈密尔顿系统与辛算法的暂态稳定约束最优潮流[J]. 电网技术,2015,39(5):1329-1336.  
LIU Pengfei, WEI Hua, LI Bin, et al. Transient stability constrained optimal power flow based on hamiltonian system and symplectic algorithm [J]. Power System Technology, 2015, 39(5):1329-1336.
- [8] 韩其国, 陈功洵, 肖宏飞. 基于有效集减空间逐次二次规划算法的电力系统暂态稳定约束最优潮流[J]. 电力系统保护

- 与控制,2016,44(8):126-131.
- HAN Qiguo, CHEN Gongxun, XIAO Hongfei. Power system transient stability constrained optimal power flow based on active-set reduced-space sequential quadratic programming [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 126-131.
- [9] CHEN L N, TADA Y, OKAMOTO H, et al. Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2001. 48(3): 327-339.
- [10] 杨新林, 孙元章, 王海风. 考虑暂态稳定性约束的最优潮流 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 13-17.
- YANG Xinlin, SUN Yuanzhang, WANG Haifeng. A new approach for optimal power flow with transient stability constraints [J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(14): 13-17.
- [11] 黄玉龙, 刘明波. 基于单机无穷大母线等值和轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 86-93.
- HUANG Yulong, LIU Mingbo. Transient stability constrained optimal power flow based on OMIB equivalent and trajectory sensitivity [J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(13): 86-93.
- [12] 卫志农, 胡文旺, 孙国强. 含 VSC-HVDC 的暂态稳定约束最优潮流 [J]. 中国电机工程学报, 2013. 33(28): 50-58.
- WEI Zhinong, HU Wenwang, SUN Guoqiang, et al. Transient stability constrained optimal power flow considering of VSC-HVDC integration [J]. Proceedings of CSEE, 2013, 33(28): 50-58.
- [13] CAI H R, CHUNG C Y, WONG K P. Application of differential evolution algorithm for transient stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 719-728.
- [14] 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.
- SUN Jingqiang, FANG Dazhong, ZHONG Dechen. Optimal power flow with transient stability constrained [J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(12): 12-17.
- [15] 卢锦玲, 张 津. 考虑暂态稳定约束的电力系统最优潮流算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 24-30.
- LU Jinling, ZHANG Jin. Optimal power flow algorithm with transient stability constraints in power system [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 24-30.
- [16] 夏小琴. 基于减空间内点法及 Adams 法的暂态稳定约束最优潮流 [D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- XIA Xiaoqin. Transient stability constrained optimal power flow based on reduced-space interior point method and Adams method [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [17] 刘盛松, 秦旭东, 汪志成, 等. 计及潮流断面稳定限额的分区电网最大供电能力研究 [J]. 江苏电机工程, 2015, 34(4): 5-9.
- LIU Shengsong, QIN Xudong, WANG Zhicheng, et al. Study on total supply capability of zone grids considering interface flow limits [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(4): 5-9.
- [18] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 3(3): 870-877.

#### 作者简介:



夏小琴

夏小琴(1988—),女,硕士,工程师,从事电力系统稳定分析与控制工作(E-mail: xi Xiaoqin@sgepri.sgcc.com.cn);

徐 伟(1982—),男,博士,高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制工作。

## Transient Stability Constrained Optimal Power Flow Model Considering Power Adjustments and Variable Step Size

XIA Xiaoqin, XU Wei

(Nari Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to meet the rapid adjustment needs of power grid operation after accidents, a new model of transient stability constrained optimal power flow (TSCOPF) is established. The model is to achieve the objective of minimum power adjustment. Furthermore, variable step strategy is adopted to adjust the steps of before and after clearing fault separately. The objective of the model is closely related to the degree of system instability. It solves the problem that the power adjustment of the traditional TSCOPF is too large. To ensure that the fault cleaning time and simulation end time can be simulated accurately, the two stages of the variable step strategy makes the numerical method reach the key time with integer steps. Primal-dual interior point method is used to solve the problem. Numerical simulations on the three test systems, IEEE-9, NE-39 and IEEE-118, have shown that the proposed method is helpful for dispatchers to deal with accidents quickly which improves the practical level of TSCOPF.

**Key words:** optimal power flow; transient stability; power adjustment; variable step size

(编辑 方 晶)