

基于功率灵敏度和经济补偿最小化的 线路过负荷紧急控制方法

徐 岩¹, 邗 静², 樊世通³

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 国网江苏省电力公司检修分公司苏州运维分部, 江苏 苏州 215000;

3. 国网江苏省电力公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 为避免切除因潮流转移导致过载的线路, 提出一种基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法。利用功率灵敏度矩阵反映各节点注入功率变量对线路功率变量的影响, 以经济补偿最小化为目标, 利用非线性优化得到满足线路过负荷消除约束、节点可调量约束、系统功率平衡约束及正常线路冗余量约束的紧急控制方法。所提方法可计算平衡机对电网各线路功率的灵敏度, 令平衡机参与到紧急控制中, 提高了电网保持稳定运行的能力; 同时, 其以经济补偿最小为目标, 实用价值更高。将局部灵敏度计算法和稀疏向量技术结合, 有效减少了计算量和内存量。在 IEEE 39 节点系统中所提方法的正确性和优越性进行了验证。

关键词: 电力系统; 紧急控制; 功率灵敏度; 经济补偿最小化; 潮流转移; 过负荷

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.019

0 引言

电力系统中, 线路因发生故障被切除时会引发潮流转移, 这很容易导致其他线路过载, 从而引起过负荷后备保护动作切除线路, 易导致连锁跳闸, 甚至大停电事故^[1]。针对因潮流转移导致过载的线路, 快速闭锁其后备保护, 并采取调整发电机出力甚至切负荷等紧急控制措施消除线路过载, 可有效防止线路连锁跳闸的发生。

现有紧急控制方法有灵敏度法^[2-4]和优化规划法^[5-6]。灵敏度法根据电网各节点对过载线路的控制灵敏度逐个选择最佳控制节点, 每一轮控制都选择当前控制灵敏度最大的控制节点组, 该方法容易实现调整量最小的目标, 但无法考虑紧急控制中的经济因素。优化规划法根据各节点对过载线路的控制情况及电网各线路的功率限制约束构造数学模型, 利用最优化方法求解该模型得到控制方案, 有较好的全局性和经济性, 但有时计算量较大, 同时, 在电力市场环境下, 独立系统调度员 ISO (Independent System Operator) 在采取紧急控制措施时, 需要对被迫调整出力的发电机和被迫切负荷的用户提供一定的经济补偿^[7], 因此, 制定能够消除线路过载且经济补偿最小的紧急控制方案具有实用价值。综上所述,

本文采用优化规划法, 并利用相应方法减少计算量。

已有的紧急控制方法^[2-5, 8-10]在计算节点对过载线路的控制灵敏度时, 大都采用直流潮流法中的发电转移分布因子 GSDF (Generation Shift Distribution Factor)。GSDF 的计算依赖于平衡机的选择, 令平衡机对所有线路的灵敏度为 0^[3], 不使平衡机参与紧急控制, 易导致无法得到最优控制方案, 同时, 当平衡机不同时, 得到的紧急控制方案也可能不同^[11]。文献^[12]提出了功率灵敏度的概念, 计算出包括平衡机在内的电网各节点对过载线路的控制情况, 证明功率灵敏度在紧急控制中应用效果好, 同时, 在计算节点与线路间的功率灵敏度时, 将局部灵敏度计算法和稀疏向量技术结合, 大幅减少了计算量和内存量。

本文提出一种基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法。利用功率灵敏度矩阵反映各节点注入功率变量对线路功率变量的影响, 以经济补偿最小化为目标, 利用非线性优化得到满足线路过负荷消除约束、节点可调量约束、系统功率平衡约束及正常线路冗余量约束的紧急控制方案。该方法可计算平衡机对电网各线路功率的灵敏度, 令平衡机参与到紧急控制中, 提高了电网保持稳定运行的能力; 同时, 以经济补偿最小为目标, 使得到的紧急控制方案更具有实用价值。仿真算例验证了本文方法的正确性和优越性。

1 功率灵敏度

文献^[12]中详细介绍了功率灵敏度矩阵的推导过程。当电网发生断线故障时, 根据广域测量系统提

收稿日期: 2015-09-23; 修回日期: 2016-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50777016); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (12MS110)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (50777016) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (12MS110)

供的实测信息刷新电网拓扑结构和节点电压相量数据,可以快速计算此时的功率灵敏度矩阵,得到各节点注入功率变量对支路功率变量的控制情况。

电网中支路 B_k 的功率变量与节点 N_i 的注入功率变量之间的功率灵敏度 β_{k-i} 为:

$$\beta_{k-i} = \frac{\lambda_{k-i} U_{k,B}}{U_{i,N}} (\cos \varphi_{k,B} \cos \varphi_{i,N} + \sin \varphi_{k,B} \sin \varphi_{i,N}) \quad (1)$$

其中, λ_{k-i} 为支路 B_k 的电流相量与节点 N_i 的注入电流相量之间的电流相关度系数; $U_{k,B}$ 和 $\varphi_{k,B}$ 分别为支路 B_k 的首端电压模值和相角; $U_{i,N}$ 和 $\varphi_{i,N}$ 分别为节点 N_i 的电压模值和相角。

功率灵敏度矩阵结合网络拓扑参数和实际电网运行情况衡量节点注入功率对线路潮流的控制情况,其计算过程不依赖于平衡机的选择,能准确计算平衡机对各线路功率的灵敏度,令平衡机参与到紧急控制中。

设电网中发电机节点数为 m , 负荷节点数为 f , 当采取调节发电机出力或者切负荷等紧急控制措施时,支路 B_k 的功率变量 $\Delta P_{k,B}$ 如式(2)所示。

$$\Delta P_{k,B} = \sum_{i=1}^m \beta_{k-i} \Delta P_{i,G} + \sum_{j=1}^f \beta_{k-j} \Delta P_{j,L} \quad (2)$$

其中, $\Delta P_{i,G}$ 为发电机节点 N_{Gi} 的发电调整量; $\Delta P_{j,L}$ 为负荷节点 N_{Lj} 的切负荷量。

2 最优化求解紧急控制方案

2.1 最优化目标

为保证供电可靠性,紧急控制中应尽量依靠调整发电机出力消除过载,避免切负荷。当仅通过调整发电机出力无法得到满足系统安全运行的控制方案时,需要进一步考虑采取相应的切负荷措施^[8]。同时,在消除线路过载的紧急控制中,ISO 需要以一定的补偿价格对被迫调整出力的发电机和被迫切负荷的用户进行经济补偿^[7]。因此,在尽量避免切负荷的情况下,使经济补偿最小化的最优化目标如式(3)所示。

$$\min F = \sum_{i=1}^m \rho_i |\Delta P_{i,G}| + M \sum_{j=1}^f \lambda_j |\Delta P_{j,L}| \quad (3)$$

其中, ρ_i 为发电机节点 N_{Gi} 的单位功率变化补偿价格; λ_j 为负荷节点 N_{Lj} 的切除单位负荷的补偿价格;为尽量避免切负荷,取 M 为一个很大的正数,保证在调整发电机出力无法消除线路过载时才采取切负荷措施,本文取 $M=10^3$ 。

式(3)所示的最优化目标能够有效保证所制定的紧急控制方案在尽量避免切负荷的情况下,使经济补偿最小化。

2.2 最优化约束

2.2.1 线路过负荷消除约束

对于过载线路集合 A 中任一条过载线路 B_a , 紧急控制方案都可消除其过载,即满足:

$$\begin{cases} \Delta P_{a,B} + P_{a,B} \leq \eta P_{a,B_{\max}} \\ \Delta P_{a,B} = \sum_{i=1}^m \beta_{a-i} \Delta P_{i,G} + \sum_{j=1}^f \beta_{a-j} \Delta P_{j,L} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_{a,B}$ 为紧急控制前线路 B_a 的传输功率, $P_{a,B_{\max}}$ 为线路 B_a 的最大传输功率;考虑到功率灵敏度及调整量计算误差等因素,定义可靠系数 $\eta < 1$, 本文取 $\eta=0.9$, 实际电网中根据情况适当取值。

2.2.2 节点可调量及系统功率平衡约束

(1) 节点分类。

根据各节点对所有过载线路的综合控制作用,定义节点 N_s 的综合灵敏度如下:

$$\begin{cases} f_{A-s} = \sum_{B_a \in A} \xi_a \beta_{a-s} \\ \xi_a = P_{a,B} / P_{a,B_{\max}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, f_{A-s} 为节点 N_s 的综合灵敏度; ξ_a 为线路 B_a 的过载率,线路过载程度越大,其在综合灵敏度计算公式中的重要性权重越大。

根据节点的综合灵敏度对节点进行分类:

a. 若 $f_{A-s} > 0$ 且节点 N_s 为可调整出力的发电机节点,说明减少该节点的发电机出力可以降低所有过载线路的整体过载程度,因此,将该节点归入减出力节点集合;

b. 若 $f_{A-s} < 0$ 且节点 N_s 为可调整出力的发电机或可切负荷,说明增加该节点的发电机出力或减少该节点的负荷可以降低所有过载线路的整体过载程度,因此,将该节点归入加出力节点集合。

(2) 节点可调量及系统功率平衡约束。

减出力节点集合中发电机节点 N_{Gi} 的出力调整量 $\Delta P_{i,G}$ 需满足:

$$P_{i,G_{\min}} - P_{i,G} \leq \Delta P_{i,G} \leq 0 \quad (6)$$

其中, $P_{i,G}$ 为发电机节点 N_{Gi} 的当前发电量; $P_{i,G_{\min}}$ 为发电机节点 N_{Gi} 的最小发电量。

加出力节点集合中, $\Delta P_{i,G}$ 需满足:

$$0 \leq \Delta P_{i,G} \leq P_{i,G_{\max}} - P_{i,G} \quad (7)$$

其中, $P_{i,G_{\max}}$ 为发电机节点 N_{Gi} 的最大发电量。

当平衡机为加出力节点时,考虑平衡机在电网运行中需要承担的调频及平衡电网微小功率差额的任务^[13-14],计算其可增出力时要预留出一定裕度,即对于平衡机 G_p ,需要满足的约束是:

$$0 \leq \Delta P_{p,G} \leq P_{p,G_{\max}} - P_y - P_{p,G} \quad (8)$$

其中, P_y 为平衡机预留裕度,本文中取 $P_y=10$ MW, 实际电网运行中可根据情况适当取值。

加出力节点集合中负荷节点 N_{Lj} 的切负荷量 $\Delta P_{j,L}$ 不大于该节点的总负荷量 $P_{j,L}$,即满足:

$$0 \leq \Delta P_{j,L} \leq P_{j,L} \quad (9)$$

同时,为保证系统功率平衡,所有发电机节点的出力调整量和负荷节点的切负荷量需满足:

$$\sum_{i=1}^m \Delta P_{i,G} + \sum_{j=1}^f \Delta P_{j,L} = 0 \quad (10)$$

2.2.3 正常线路冗余量约束

紧急控制中要保证系统不出现新的线路过载,对于正常线路 B_l ,需满足如下约束:

$$\begin{cases} \Delta P_{l,B} = \sum_{i=1}^m \beta_{l-i} \Delta P_{i,G} + \sum_{j=1}^f \beta_{l-j} \Delta P_{j,L} \\ \Delta P_{l,B} + P_{l,B} \leq P_{l,Bmax} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $P_{l,B}$ 为紧急控制前线路 B_l 的传输功率; $P_{l,Bmax}$ 为线路 B_l 的最大传输功率。

本文将支路热稳定功率极限作为其最大传输功率,实际电网运行中依情况而定^[15]。

利用功率灵敏度矩阵反映各节点注入功率变量对线路功率变量的影响,以经济补偿最小化为目标,利用非线性优化可得到满足线路过负荷消除约束、节点可调量约束、系统功率平衡约束及正常线路冗余量约束的紧急控制方案。

2.3 计算量分析

制定紧急控制方案时只需计算发电机节点和负荷节点对电网线路的功率灵敏度,利用局部灵敏度算法^[12]和稀疏向量技术,可以大幅减少计算量和内存量。同时,正常线路冗余量约束保证了正常线路在紧急控制过程中不会出现过载,有效避免了潮流校验,提高了紧急控制速度。

3 仿真算例

在 IEEE 39 节点系统对本文方法进行验证,其系统接线图如图 1 所示。系统各发电机有功出力情况及单位出力变化补偿价格如表 1 所示,该系统中节点 31 是平衡机节点,计算该发电机的可增出力时需留出 10 MW 的裕度,同时,令各发电机的最小发电量为 0 MW,实际电网运行中依情况而定。因篇幅有限,仅示出该系统部分负荷节点的负荷量及单位切负荷补偿价格,如表 2 所示。

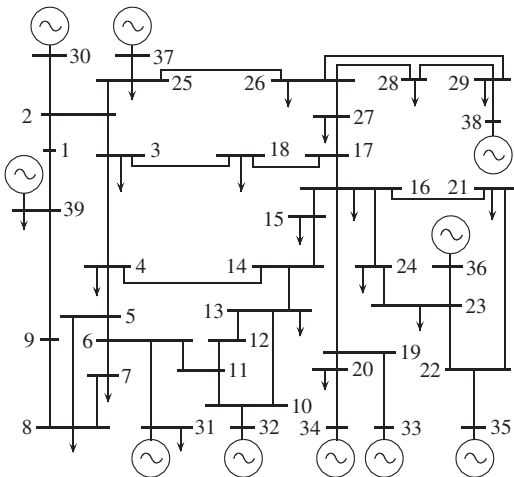


图 1 IEEE 39 节点系统
Fig.1 IEEE 39-bus system

表 1 各发电机有功出力情况及单位出力变化补偿价格

Table 1 Power output and compensation per output-changing for generators

发电机节点	发电 量/MW	最大发电 量/MW	可增出力 量/MW	补偿价格/ [\$·(MW·h) ⁻¹]
30	250	1040	790	6
31	572.83	646	63.17	5
32	650	725	75	9
33	632	652	20	8
34	508	508	0	6
35	650	687	37	9
36	560	580	20	4
37	540	564	24	5
38	830	865	35	7
39	1000	1100	100	7

表 2 部分负荷节点的负荷量及单位切负荷补偿价格

Table 2 Load and compensation per load-shedding for some load nodes

负荷节点	负荷量/MW	补偿价格/[\$·(MW·h) ⁻¹]
3	322	12
4	500	8
7	233.8	10
8	522	12
18	158	11

将本文方法定义为方法 1,将以功率灵敏度为基础以系统总调整量最小为优化目标的方法定义为方法 2,将以 GSDF 为基础以系统总调整量最小为优化目标的方法(即文献[5]中的方法)定义为方法 3。在 MATLAB 中利用优化规划法编程实现 3 种方法,当潮流转移导致系统中线路过载时,分别利用这 3 种方法制定相应的紧急控制方案,在 PSASP 中进行潮流计算验证各紧急控制方案的可行性,比较各方案的总调整量及经济补偿,验证本文所提方法的优越性。

3.1 仿真 1

IEEE 39 节点系统中,线路 B_{2-3} 和 B_{26-27} 因故障断开,导致线路 B_{2-1} 和 B_{25-2} 过载,其线路功率分别为 738.91 MW 和 505.26 MW,相应的过载率分别为 1.23 和 1.01。发电机节点及部分负荷节点对过载线路的功率灵敏度如表 3 所示。

分别利用 3 种方法制定紧急控制方案,各紧急控制方案如表 4 所示。利用 PSASP 软件验证各紧急控制方案的可行性,结果表明 3 种方法均只需调节发电机出力即可消除线路过载,使系统恢复安全运行状态,各方案的总调节量和经济补偿如表 5 所示。

3.2 仿真 2

IEEE 39 节点系统中,线路 B_{11-6} 和 B_{14-4} 因故障断开,导致线路 B_{16-17} 、 B_{3-4} 、 B_{17-18} 、 B_{13-14} 、 B_{14-15} 和 B_{10-13} 过载,过载线路功率如表 6 所示。

发电机节点及部分负荷节点对过载线路的功率灵敏度如表 7 所示。

分别利用 3 种方法制定紧急控制方案,方法 1、

表 3 线路 B₂₋₃ 和 B₂₆₋₂₇ 断开时部分节点对
过载线路的功率灵敏度
Table3 Power sensitivity of partial nodes to overload
line when Line B₂₋₃ and B₂₆₋₂₇ are cut off

节点	功率灵敏度		综合灵敏度
	对 B ₂₋₁	对 B ₂₅₋₂	
30	0.856	-0.107	0.947
31	-0.409	-0.347	-0.855
32	-0.412	-0.350	-0.862
33	-0.398	-0.334	-0.828
34	-0.382	-0.320	-0.794
35	-0.394	-0.333	-0.822
36	-0.405	-0.343	-0.846
37	0.885	0.944	2.044
38	0.952	1.024	2.208
39	-0.292	-0.251	-0.614
3	-0.302	-0.247	-0.621
4	-0.329	-0.272	-0.680
7	-0.343	-0.287	-0.713
8	-0.342	-0.286	-0.711
18	-0.303	-0.248	-0.624

表 4 仿真 1 的紧急控制方案
Table 4 Emergency control scheme for Simulation 1

发电机 节点	发电调整量/MW		
	方法 1	方法 2	方法 3
30	0	0	-66.303
31	63.17	63.17	—
32	0	75	60.955
33	20	0.0002	20
34	0	0	0
35	0	0.003	37
36	20	19.623	20
37	-158.998	-0.005	-66.303
38	0	-157.792	-66.303
39	55.828	0	60.955

表 5 仿真 1 中各方法的总调节量和经济补偿
Table 5 Total power regulation and economic
compensation for different strategies of Simulation 1

方法	总调节量/MW	总经济补偿/(\$·h ⁻¹)
方法 1	318.00	1741.63
方法 2	315.59	2173.94
方法 3	397.82	2741.74

表 6 线路 B₁₁₋₆ 和 B₁₄₋₄ 断开时的过载线路功率

Table 6 Power of overload lines when
Line B₁₁₋₆ and B₁₄₋₄ are cut off

过载线路	功率/MW	热稳定功率极限/MW	过载率
B ₁₆₋₁₇	801.97	600	1.34
B ₃₋₄	547.05	500	1.09
B ₁₇₋₁₈	648.99	600	1.08
B ₁₃₋₁₄	639.91	600	1.07
B ₁₄₋₁₅	636.30	600	1.06
B ₁₀₋₁₃	617.41	600	1.03

2 均只需调节发电机出力即可消除线路过载,方法 3 需要切负荷才能消除所有线路过载。各紧急控制方案如表 8 所示(负荷节点的调整量即为切负荷量),各方案的总调节量和经济补偿如表 9 所示。

表 7 线路 B₁₁₋₆ 和 B₁₄₋₄ 断开时部分节点对
过载线路的功率灵敏度

Table 7 Power sensitivity of partial nodes to overload
line when Line B₁₁₋₆ and B₁₄₋₄ are cut off

节点	功率灵敏度						综合功率 灵敏度
	对 B ₁₆₋₁₇	对 B ₃₋₄	对 B ₁₇₋₁₈	对 B ₁₃₋₁₄	对 B ₁₄₋₁₅	对 B ₁₀₋₁₃	
30	-0.243	0.122	-0.256	-0.028	-0.061	-0.016	-0.579
31	-0.268	-0.642	-0.396	-0.031	-0.066	-0.017	-1.609
32	0.782	0.177	0.421	1.002	0.963	0.972	4.786
33	0.804	0.191	0.440	-0.025	-0.053	-0.014	1.663
34	0.795	0.190	0.436	-0.025	-0.052	-0.014	1.647
35	0.765	0.181	0.417	-0.024	-0.051	-0.013	1.578
36	0.746	0.175	0.406	-0.024	-0.050	-0.013	1.536
37	-0.248	0.132	-0.178	-0.030	-0.063	-0.016	-0.495
38	-0.248	0.167	0.132	-0.031	-0.065	-0.017	-0.125
39	-0.260	-0.257	-0.334	-0.029	-0.063	-0.016	-1.104
3	-0.243	0.200	-0.390	-0.028	-0.059	-0.015	-0.637
4	-0.255	-0.717	-0.394	-0.028	-0.061	-0.015	-1.662
7	-0.259	-0.622	-0.385	-0.028	-0.062	-0.015	-1.555
8	-0.259	-0.612	-0.384	-0.028	-0.062	-0.015	-1.542
18	-0.230	0.197	-0.501	-0.027	-0.057	-0.015	-0.738

表 8 仿真 2 的紧急控制方案

Table 8 Emergency control scheme for Simulation 2

节点	调整量/MW		
	方法 1	方法 2	方法 3
30	78.07	26.634	101.009
31	63.17	63.17	0
32	-95.996	-96.153	-102.884
33	-0.017	-152.649	-39.772
34	0	-0.002	-39.772
35	0	0	-39.772
36	-162.007	0	-39.772
37	24	24	0
38	0	35	4.161
39	92.78	100	100
3	0	0	0
4	0	0	56.868
7	0	0	0
8	0	0	0
18	0	0	0

表 9 仿真 2 中各方法的总调节量和经济补偿

Table 9 Total power regulation and economic
compensation for different strategies of Simulation 2

方法	总调节量/MW	总经济补偿/(\$·h ⁻¹)
方法 1	516.04	3065.85
方法 2	497.61	3627.23
方法 3	523.95	3789.43

a. 由表 4 和表 9 可知,方法 1 虽然在总调节量上略多于方法 2,但在总经济补偿代价上有较大优势,因此,以经济补偿最小化为目标得到的紧急控制方案有更大的实用价值。

对比方法 2 和方法 3 可知,方法 2 在总调节量和总经济补偿上都少于方法 3。结合表 4 和表 7 中这 2 种方法的紧急控制方案可知,平衡机在紧急控制中发挥了重要作用。因此,利用功率灵敏度矩阵衡量节点注入功率变量对线路功率变量的控制情况,

计算平衡机对各线路功率的灵敏度,令平衡机参与到紧急控制中,可以有效减少消除线路过载所需的总调节量和总经济补偿,得到更好的紧急控制方案。和方法 3 相比,方法 1 在总控制量和总经济补偿上都有很大优势,再次验证了本文方法的优越性。

b. 仿真 1 中,3 种方法均只需调节发电机出力即可消除线路过载,使系统恢复安全运行状态;仿真 2 中,方法 1 和方法 2 均只需调整发电机出力即可消除线路过载,而方法 3 除了调整发电机出力之外,还需要切负荷才能消除线路过载,证明了使平衡机参与紧急控制的优势。

需要说明的是,仿真 2 中方法 3 所得的紧急控制方案中,在系统加出力发电机并未完全用尽其可增出力量的情况下就采取了切负荷措施,这是因为为保证紧急控制中不出现新的线路过载,系统正常线路冗余量限制了部分发电机的加出力量。

c. 本文仿真中所采用的补偿价格数据,是在文献[7]的基础上进行修改后得到的,实际电网中依情况而定,仿真所用数据不影响对本文方法优越性的验证。

d. 式(3)中 M 的取值并无规定,只要能够体现负荷节点优先级低于发电机节点的合适取值均可。

4 结论

本文提出一种基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法。利用功率灵敏度矩阵反映各节点注入功率变量对线路功率变量的影响,计算平衡机对各线路功率的灵敏度,令平衡机参与到紧急控制中。以经济补偿最小化为目标,利用非线性优化得到满足线路过负荷消除约束、节点可调度约束、系统功率平衡约束及正常线路冗余量约束的紧急控制方案。仿真算例验证了本文方法的正确性和优越性。

本文方法虽有一定的有效性,但是在考虑紧急控制的经济代价时只考虑了经济补偿最小化,如何综合考虑事故风险及紧急控制过程中其他经济代价等因素来全面衡量经济损失是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 任建文,魏俊姣,谷雨峰. 基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):53-59.
REN Jianwen,WEI Junjiao,GU Yufeng. Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):53-59.
- [2] 程临燕,张保会,郝治国,等. 基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):46-49.
CHENG Linyan,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo,et al. Fast control

- algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):46-49.
- [3] 邓佑满,黎辉,张伯明,等. 电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J]. 电力系统自动化,1999,23(18):5-8.
DENG Youman,LI Hui,ZHANG Boming,et al. Adjustment of equal and opposite quantities in pairs for strategy of active power security correction of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(18):5-8.
- [4] 李刚,王增平,任建文,等. 基于图论分区与改进 BFS 算法搜索安全约束集的防连锁过载控制策略[J]. 电工技术学报,2012,27(11):219-229.
LI Gang,WANG Zengping,REN Jianwen,et al. A control strategy to prevent cascading overload with security constraint set searched by graph theory partition and improved BFS algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(11):219-229.
- [5] 程临燕,郝治国,张保会,等. 基于内点法消除输电断面过载的实时控制算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):51-55.
CHENG Linyan,HAO Zhiguo,ZHANG Baohui,et al. Fast elimination of overload in transmission line section based on simplified primal-dual interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):51-55.
- [6] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 一种基于连续线性规划技术的在线静态安全校正算法[J]. 电网技术,2005,29(5):25-30.
ZHAO Jinquan,CHIANG Hsiadong,ZHANG Boming. A successive linear programming based on-line static security corrective control approach[J]. Power System Technology,2005,29(5):25-30.
- [7] 孔祥玉,房大中,钟德成. 电力市场稳定安全约束下的经济代价最小数学模型[J]. 电力系统自动化,2004,28(6):25-29.
KONG Xiangyu,FANG Dazhong,ZHONG Decheng. Mathematic models for minimum cost in security management of power market[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(6):25-29.
- [8] 姜臻,苗世洪,刘沛,等. 一种基于粒子群优化算法的转移潮流控制策略[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):16-20.
JIANG Zhen,MIAO Shihong,LIU Pei,et al. A particle swarm optimization based power flow transferring control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(18):16-20.
- [9] 曲正伟,王京波,张坤,等. 考虑不确定性成本的含风电场群电力系统短期优化调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):137-144.
QU Zhengwei,WANG Jingbo,ZHANG Kun,et al. Short-term optimal dispatch considering uncertainty cost for power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):137-144.
- [10] 袁晓丹,张会强. 多支路开断潮流转移识别及防连锁过载策略研究[J]. 现代电力,2014,31(5):74-79.
YUAN Xiaodan,ZHANG Huiqiang. Study on power flow transferring identification of multi-line tripping and the strategy to prevent cascading overload strategy[J]. Modern Electric Power,2014,31(5):74-79.
- [11] 沈瑜,夏清,康重庆. 发电联合转移分布因子及快速静态安全核算算法[J]. 电力系统自动化,2003,27(18):13-17.
SHEN Yu,XIA Qing,KANG Chongqing. Generation Jointly Shift Distribution Factor(GJSDF) and fast security analysis algorithm in economic dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(18):13-17.

[12] 徐岩,邳静. 基于功率灵敏度的线路过载划区域紧急控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(15):60-72.
XU Yan,ZHI Jing. A zone-divided emergency control strategy for overload lines based on power sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(15):60-72.

[13] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社,2007: 201-219.

[14] 任建文,李莎,严敏敏,等. 基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧急控制策略[J]. 电网技术,2013,37(2):392-397.
REN Jianwen,LI Sha,YAN Minmin,et al. Emergency control strategy for line overload based on power flow tracing algorithm[J]. Power System Technology,2013,37(2):392-397.

[15] 杨文辉. 预防连锁跳闸的关键线路后备保护与紧急控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
YANG Wenhui. Study on backup protection and control

strategy for critical lines against cascading trips[D]. Beijing: North China Electric Power University,2012.

作者简介:



徐 岩

徐 岩(1976—),男,吉林吉林人,副教授,博士,研究方向为电力系统保护与安全控制、新能源发电和智能电网(E-mail: xy19761001@aliyun.com);

邳 静(1990—),女,河北南宫人,硕士,研究方向为电力系统保护与安全控制(E-mail:zj1217@139.com);

樊世通(1990—),男,河北保定人,硕士,研究方向为电力系统保护与安全控制、新能源发电技术(E-mail:fst001@139.com)。

Line overload emergency control based on power sensitivity and minimized economic compensation

XU Yan¹,ZHI Jing²,FAN Shitong³

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch Company Suzhou Division, Suzhou 215000, China;
3. State Grid Jiangsu Electric Power Company Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: A strategy of emergency control based on power sensitivity and minimized economic compensation is proposed to avoid the cutoff of overloaded lines caused by the power flow transfer, which applies the power sensitivity matrix to reflect the influence of nodal injection power on the line power and the nonlinear optimization to obtain the emergency control strategy with the minimized economic compensation as its objective and the line overload elimination, adjustable nodal power, system power balance and normal line redundancy as its constraints. It calculates the sensitivity of balance generator to the power of each line and makes the balance generator participating in the emergency control to improve the stable operation ability of power system. As it takes the minimized economic compensation as its objective, it has higher practicability. It combines the local sensitivity calculation with the sparse vector technique to effectively reduce the computation load and memory size. The validity and superiority of the proposed strategy are verified with IEEE 39-bus system.

Key words: electric power systems; emergency control; power sensitivity; minimized economic compensation; power flow transfer; overload