

DOI: 10.7667/PSPC170466

基于改进 REI 等值法的网架调整限流策略

惠宇翔¹, 黄景光¹, 李正天², 林湘宁^{1,2}

(1. 电气与新能源学院(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了提高传统全网遍历限流方案的求解效率, 面对大规模电力系统, 给出一种基于改进 REI 等值法的网架调整限流策略。将网络等值技术与 500 kV 网架调整限流机理相结合, 根据支路限流灵敏度指标对原系统进行一次预处理, 将其划分为研究系统和若干外部子系统。再利用改进的动态 REI 等值法对各子系统进行化简, 以等值过程中各发电机在虚拟支路上的功率传输因子来确定等值发电机的参数。通过在两个算例上的仿真实验验证, 结果表明改进后的 REI 等值法能够较好地保留原系统的动态特性, 同时迅速筛选出最优限流开断线路方案。

关键词: 短路电流超标; 限流灵敏度; REI 等值法; 功率传输因子; 动态特性

Current limiting strategy by adjusting power grid configuration based on improved REI equivalent method

HUI Yuxiang¹, HUANG Jingguang¹, LI Zhengtian², LIN Xiangning^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For increasing the efficiency of previous whole network traversal current limiting project, a current limiting strategy by adjusting power grid configuration based on improved REI equivalence is proposed for large-scale power system. It combines the network equivalence technology with current limiting mechanism by adjusting 500 kV power system configuration and carries out a pretreatment to primary system according to the branch current limiting sensitivity index. Original system is divided into research system and several external subsystems. The subsystems are simplified using improved dynamic REI equivalence method, and the parameters of the equivalent generator are calculated according to power transfer distribution factors of each generator on virtual branch during equivalence. The simulation results of two cases show that the improved REI equivalence method can better preserve the dynamic characteristics of the original system and quickly select the optimal breaking lines.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577077 and No. 51477090).

Key words: short-circuit current over-limited; current limiting sensitivity index; REI reduction technique; power transfer distribution factors; dynamic characteristics

0 引言

随着电网规模不断扩大, 区域间电网联系日益紧密, 导致系统短路电流水平也在逐年攀升, 目前部分电网企业正在经受短路电流超标问题的考验并采取了相应措施^[1-3]。从限流效果和工程实现难易来看, 开断线路以其便于实施且无需投入额外成本而

被广泛采用^[4-6]。文献[7-8]利用短路点自阻抗分析了 500 kV 电网短路电流超标机理, 指出电气距离的缩短是引发短路电流超标的本质原因, 从而进一步研究线路开断与超标点自阻抗的关系, 最后通过全网遍历搜索找到最优断线组合方案。

在实际电网中, 短路水平过高的站点往往集中在少数几个区域, 在选择最优断线组合方案时, 如果选择全网遍历的方法, 显然会浪费时间, 降低效率。文献[9]将 ward 等值法用在开断线路限流模型

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577077; 51477090)

中,通过仿真结果验证了该方法的可行性。但是系统等值的动态特性在文中没有提及,忽略了节点电压变化引起的等值非线性误差。文献[10]提出了一种考虑短路电流指标的动态等值法,利用发电机与边界母线的电气距离确定等值机参数,使得系统在等值后仍保留良好的动态特性。

在面对大规模电力网络时,相比于其他等值法,REI等值法具有优良的计算速度与精度,能够更好地满足内网扰动时外网响应^[11-12]。文献[13]将REI等值法用在多节点配电系统短路计算,在简化原有数学模型的同时提高了短路电流计算精度。文献[14]基于GrHDP算法对同调等值模型进行差额动态补偿,在实时跟踪原系统动态特性上取得了良好的时效性。文献[15]提出了一种利用递推最小二乘法实时辨别多端口外网静态等值参数的方法,解决了因外部网络信息不足无法在线等值系统网络的问题。

本文基于开断线路限流机理,进一步推导出线路综合限流灵敏度,再将常规REI等值法做动态等值改进处理,定义REI等值网中各发电机功率传输因子,根据机组出力在等效惯性常数中所占权重进行等值机参数聚合,提出一种基于动态REI等值的网架调整限流策略。等值中保留关键限流支路,计算等值后系统综合限流灵敏度,得到限流断线措施优先级,确定最优断线组合。最后以两个算例对动态等值效果及开断限流策略进行分析,仿真结果验证了该方法的有效性。

1 开断线路灵敏度分析

本文侧重于分析高压电网下的短路电流,故只考虑了设备的电抗值。此外,三相短路故障带来的影响在实际电网运行中最为严重,以下主要针对此类故障进行讨论。由于其对称性,在分析问题时为了简化,只考虑其中一相。

1.1 开断线路限流机理

设初始网络的注入电流为一矩阵 \mathbf{I} ,在节点 m 处发生三相短路故障,相应的短路电流为 i_m ,则故障后的节点电压矩阵为

$$\mathbf{U}' = \mathbf{Z}\mathbf{I} + \mathbf{Z}\mathbf{a}_m(-i_m) = \mathbf{U} - \mathbf{Z}\mathbf{a}_m i_m \quad (1)$$

式中: \mathbf{Z} 为故障前网络节点阻抗矩阵; \mathbf{U} 为故障前节点电压矩阵; $\mathbf{a}_m = [0, 0, \dots, 1, \dots, 0]^T$ 。

发生三相短路以后,节点 m 处电压为0,所以有故障后节点电压矩阵

$$\mathbf{U}'_m = \mathbf{U}_m - \mathbf{Z}_{mm} i_m = 0 \quad (2)$$

式中, \mathbf{Z}_{mm} 为 m 点自阻抗。

假设短路前各节点电压为单位量,则有节点 m 处的短路电流:

$$i_m = \mathbf{U}_m / \mathbf{Z}_{mm} \approx 1 / \mathbf{Z}_{mm} \quad (3)$$

从式(3)观察短路电流与节点自阻抗的关系,可以得出通过增大超标节点自阻抗可以有效改善短路电流超标的结论。

1.2 单超标站点限流灵敏度

节点阻抗矩阵作为表征电力系统网络拓扑和元件参数的数学模型,同时也反应了系统节点之间的电气距离,即其耦合紧密程度。由上一小节的分析可知,开断与超标站点耦合较强的线路可以有效减小短路电流。

对于超标站点 m ,假定断路器遮断电流值为 i_{\max} ,有超标量为 $\Delta i = i_m - i_{\max}$ 。则超标节点自阻抗最小增量为

$$\Delta \mathbf{Z} = \mathbf{Z}'_{mm} - \mathbf{Z}_{mm} = \frac{\Delta i}{i_{\max} \cdot i_m} \quad (4)$$

式中, \mathbf{Z}'_{mm} 为断开支路后的 m 节点自阻抗。

若开断网络任一支路 $i-j(i \neq j)$,则节点 m 自阻抗增量为^[16]

$$\mathbf{Z}'_{mm} = \frac{(\mathbf{Z}_{mi} - k\mathbf{Z}_{mj})^2}{\mathbf{Z}_{ii} + k^2\mathbf{Z}_{jj} - 2k\mathbf{Z}_{ij} - z_{ij}} \quad (5)$$

式中: z_{ij} 为线路 $i-j$ 的支路阻抗; \mathbf{Z}_{ij} 为节点阻抗矩阵的第 i 行 j 列;变压器支路时, k 取 $\frac{U_j}{U_i}$,线路支路时,则 $k=1$ 。

根据式(5)定义,用 $\theta_{ij,m}$ 对其重新表达。 $\theta_{ij,m}$ 代表着开断支路 $i-j$ 对超标站点 m 限流的灵敏度,其值越大,则对应限流效果越好。

依照所得 $\theta_{ij,m}$ 大小进行排序,确定线路开断优先级。如果存在 $\mathbf{Z}'_{mm} < \Delta \mathbf{Z}$ 情况,说明仅仅开断线路 $i-j$ 不足以将超标站点短路电流限制到遮断容量以下,此时需要增加开断线路数,直至达到最低自阻抗增量 $\Delta \mathbf{Z}$,满足限流要求。

1.3 多超标站点限流灵敏度

从电网运行实况来看,在出现短路电流超标场景时,电流超标站点可能不止一个,此时开断线路要同时考虑到对多个超标站点的限流效果。根据各超标站点的电流超标量确定站点超标严重程度。

$$\alpha_f = \left(\frac{i_f}{i_{\max}} \right)^r, f \in F \quad (6)$$

式中: F 为超标站点集合; i_f 代表站点 f 的故障电流值; i_{\max} 是断路器额定遮断电流; r 为常数。

a_f 越大则表示站点 f 超标场景越严重, 根据超标严重程度指标, 进一步得到断开支路 $i-j$ 对整个系统的综合限流灵敏度:

$$\theta'_{ij} = \sum_F \alpha_f \theta_{ij,f}, f \subset F \quad (7)$$

2 基于网架调整的网络等值法

网络等值作为一种系统网络化简方法, 旨在突出研究重点, 简化系统庞大的变量与各无需重点考虑部分, 将电力网络划分为内部系统和外部系统, 根据研究目的不同, 划分区域与等值法的选择也有所区别。

本文以限制短路电流为背景, 考察内部系统发生扰动时外部系统的动态响应过程, 故常规的静态等值法带来的误差是不可忽视的。介于 REI 等值法的高暂态拟合性, 对常规 REI 等值做动态等值改进, 并将改进后的等值法用于限流等值策略。

2.1 REI 静态等值

REI 等值法的主要思想是在把网络中的节点划分保留节点和待消去节点之后, 对待消去节点中有源节点依其性质进行分类, 再用一虚拟等价有源节点来代替, 从而构造一个虚拟无损 REI 网络, 如图 1 所示, 最后对该无源网络采取常规网络化简方法进行消去。下面进行简要阐述。

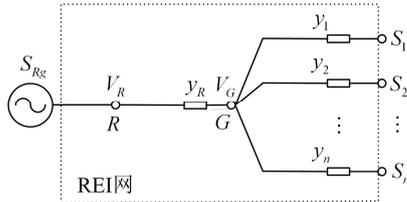


图 1 REI 等值原理

Fig. 1 Theory of the REI reduction technique

等值之前对外部系统中节点性质进行分类归组, 图 1 仅代表一种分组情况, 以一虚拟有源节点 R 代替外部系统中原有若干有源节点, 并通过一个无损 REI 网络接到原有源节点。接入 y_R 以抵消 $y_1 \sim y_n$ 中产生的损耗。

$$S_R = \sum_{i=1}^n S_i \quad (8)$$

$$V_R = \frac{S_R}{\sum_{i=1}^n S_i / V_i} \quad (9)$$

$$y_i = \frac{-S_i^*}{|V_i|^2} \quad (10)$$

$$y_R = \frac{S_R^*}{|V_R|^2} \quad (11)$$

R 点处电压可由式(8)、式(9)联立求解。 G 点电压一般设置为 0 V , 导纳 y_R 及 $y_1 \sim y_n$ 的参数易由式(10)、式(11)计算得到。

2.2 动态等值

基于静态 REI 等值的动态等值改进, 选择在系统边界节点处对外部系统进行 REI 等值, 化简基本步骤与方法同上一小节类似。

如图 2 所示, f 为 REI 等值边界节点, A 代表内部系统节点, 等值过程中只对 f 点以外的系统操作, A 与 f 间不予变动。 G_1 、 G_2 为外部系统的有源节点, f 节点与其有着直接或间接电气联系。 z_{1f} (z_{1f}) 与 y_{f0} 分别为等值阻抗和并联导纳。

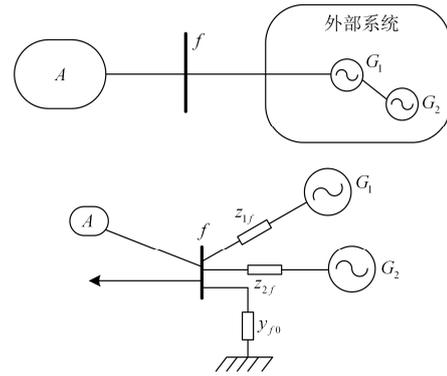


图 2 REI 动态等值示意图

Fig. 2 Illustration of the REI dynamic reduction technique

短路后电网中的负荷可近似用恒定阻抗表示^[17], 故在短路计算时可将其导纳值并入全网导纳矩阵。导纳增量由式(12)给出, 其导纳值由式(13)求解可得

$$Y_l = \text{diag}[Y_{l,1}, \dots, Y_{l,k}] \quad (12)$$

$$Y_{l,k} = \frac{P_{l,k} - jQ_{l,k}}{U_k^2} \quad (13)$$

式中: $P_{l,k}$ 和 $Q_{l,k}$ 为负荷的有功、无功分量; $Y_{l,k}$ 为负荷导纳值; U_k 为负荷端电压; k 为母线标号。

设待等值系统中有源节点集合为 k , 负载节点集合为 c , 进行 REI 等值的边界节点集合为 f , r 为包含 f 和 k 的节点集合。经过以上定义, 对原系统有如式(14)节点方程。

$$\begin{bmatrix} I_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{rr} & Y_{rc} \\ Y_{cr} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ V_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, 由于已经将负载等效导纳并入网络导纳矩阵中, 故 $I_c=0$ 。

简单推导可得:

$$I_r = (Y_{rr} - Y_{rc} Y_{cc}^{-1} Y_{cr}) V_r = Y_r V_r \quad (15)$$

根据 r 定义, 又有

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{kk} & Y_{kf} \\ Y_{fk} & Y_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_f \end{bmatrix} \quad (16)$$

从式(14), 可以推出边界节点的注入电流:

$$I_f = \sum_k Y_{fk} V_k + Y_{ff} V_f \quad (17)$$

同时, 并联导纳的参数为

$$y_{fo} = -\sum_k Y_{fk} - Y_{ff} \quad (18)$$

等值的最后需要对外部系统中的若干发电机进行聚合, 从而确定等值机的次暂态电抗等相关参数。考虑发电机惯性常数对系统暂态稳定的影响^[18], 引入发电机惯性常数辅助求解。将某待聚合发电机在虚拟支路上的传输功率与该发电机在潮流基解下的总视在功率的比值, 定义为功率分布因子。

$$PF_{jf} = \frac{S_{jf}}{P_j} \quad (19)$$

式中: S_{jf} 为发电机 j 对节点 f 的传输功率; P_j 为发电机 j 在潮流基解下的有功出力。

根据以上功率分布因子的求解, 在节点 g 处的聚合发电机视在功率由式(20)给出。

$$S_{Ng} = \sum_j PF_{jf} S_{Nj} \quad (20)$$

式中: S_{Nj} 为外部系统发电机的基准功率; 基准电压 V_{Nj} 为边界节点 f 的额定电压。

下面将若干并联发电机的惯性常数用等值机的等值惯性常数 H_g 代替, 根据惯性常数的本质定义, 用功率分布因子进行表示为

$$H_g = \frac{\sum_j PF_{jf} H_j S_{Nj}}{S_{Ng}} \quad (21)$$

利用惯性常数占有权重进一步估得等值机相关参数, 式(22)以次暂态电抗为例作为说明, 电阻、电抗和时间常数等可类比求得。

$$x_{dg}'' = \frac{\sum_j H_j x_{dj}''}{H_g} \quad (22)$$

3 动态等值下的限流策略

采取以上方法对原系统进行等值操作, 在内部系统里计算支路开断限流灵敏度, 并依照灵敏度大小对支路进行排序编号。限流策略具体步骤如下所述。

Step1: 对原系统进行初始潮流计算, 得到系统母线电压及各支路、负荷功率等数据。

Step2: 设置故障点, 找到短路电流超标站点, 计算支路限流灵敏度并把原系统分为内部系统和外部系统。

Step3: 对外部系统分组并进行负荷移置及母线化简。

Step4: 同组相关发电机群进行节点合并及等值机动态聚合, 计算相关参数。等值后对系统再次进行潮流及暂态稳定计算, 对比等值前后的数据, 验证等值效果。

Step5: 比较故障前后三相短路电流水平, 得到各站点电流超标量。根据各站点短路电流超标量确定严重程度, 计算支路综合限流灵敏度。

Step6: 对研究系统中支路综合限流灵敏度降序排列, 设置初始断线数为 n , 找到候选开断支路集。对比各支路的限流效果, 核定是否满足安全要求。

Step7: 在能满足系统限流要求下, 选取综合限流灵敏度最大的支路组合为最优开断措施, 完成开断线路筛选工作。

Step8: 若 Step6 无法通过, 则将断线数设置为 $n+1$, 返回重复操作。直至满足限流要求为止, 得出最优断线方案。

4 仿真实验

为验证本文所述动态等值方法的有效性, 以文献[19]中经典四机两区域系统作为研究对象, 下面均以 Kundur 系统说明, 该系统参数已在书中详尽给出。后在新英格兰 10 机 39 节点系统上对基于等值法的断线限流策略进行试验。

4.1 Kundur 系统

图 3 给出了原始 Kundur 系统, 处在虚线内的网络视为内部系统, 对外网进行等值操作, 图 4 为采取动态 REI 等值后的 Kundur 系统。节点 6x 和 10x 分别为外部系统节点 1, 2, 5 和 3, 4, 11 的等值节点, 接在这两节点上的发电机为聚合后的等值机, 支路

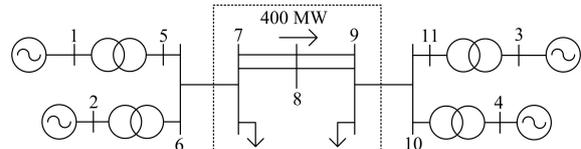


图 3 Kundur 测试系统

Fig. 3 Kundur's 2-area test system

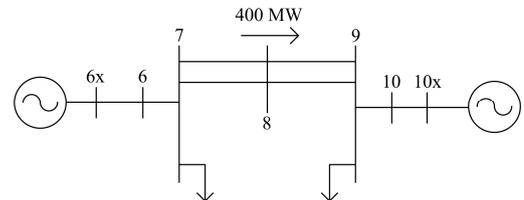


图 4 等值后 Kundur 测试系统

Fig. 4 Reduced Kundur's 2-area test system

6-6x, 10-10x 为等值过程中假定的虚拟支路, 该支路上的虚拟阻抗用所述方法可以求得 $z_{fg}=0.000204+j0.011913$ p.u.。

分别从系统稳态和时域动态下评价等值效果, 表 1 给出了等值前后边界节点 6, 10 的有功功率和电压幅值。在节点 8 设置一个三相短路故障扰动, 持续时间 0.08 s, 仿真 5 s。图 5~图 6 为此等值前后转速的振荡曲线和节点 7, 8, 9 处电压幅值, 可以看出等值后系统测量点处电压相对于原系统是完全一样的, 等值机与原发电机摇摆曲线也近乎处在均值范围内。结果表明, 运用改进 REI 动态等值法对系统进行等值化简, 等值后网络保留了原网络的动态特性, 等值效果良好。

表 1 Kundur 系统潮流参数对比

参数	原始系统	等值系统
P_{6-7}/MW	1 387.64	1 391.97
P_{9-10}/MW	1 406.02	1 410.18
V_6/kV	224.986	232.507
V_{10}/kV	226.221	232.426

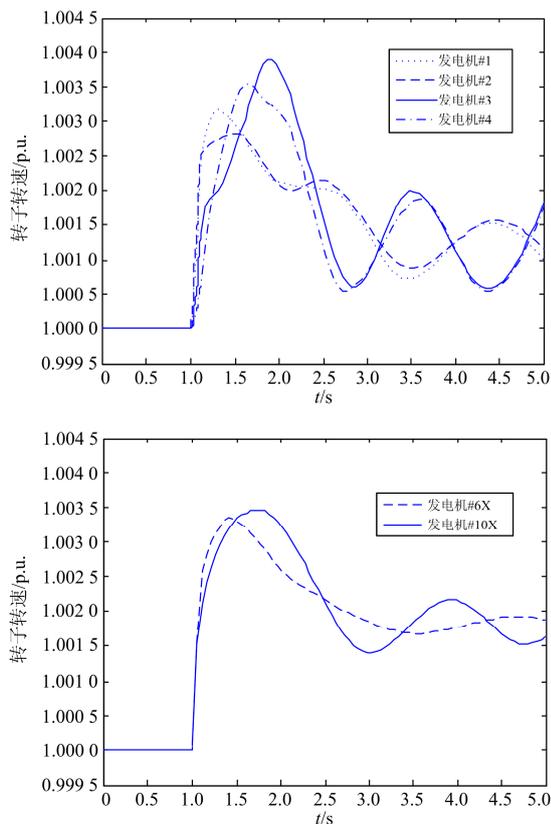


图 5 等值前后发电机摇摆曲线

Fig. 5 Rotor speeds of generators for the original and the reduced networks

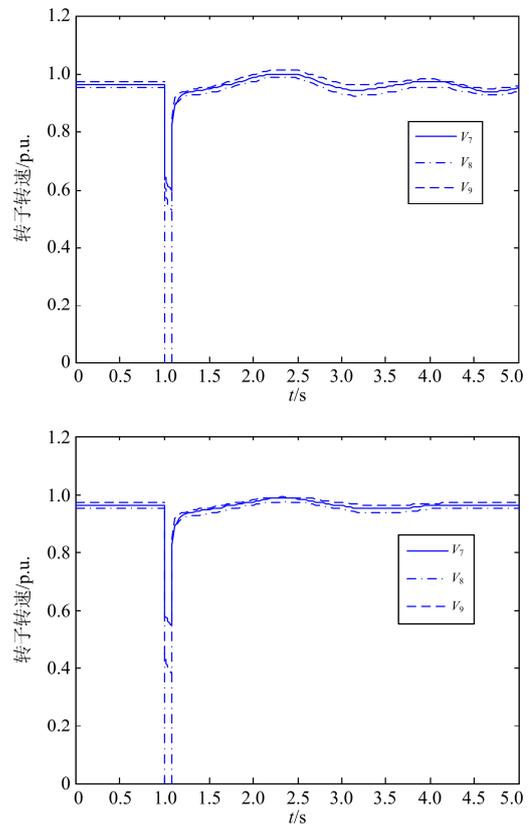


图 6 等值前后节点电压

Fig. 6 Voltages at buses for the original and the reduced networks

4.2 39 节点仿真系统

图 7 为新英格兰 10 机 39 节点系统网络接线图, 设定系统节点(除开发电机节点)电压等级为 220 kV, 基准电压为 242 kV, 短路电流限制为 65 p.u.。经短路计算, 得到超标节点 2、16 和 39, 其三相短路电流分别达到 71.55 p.u.、70.26 p.u.和 72.48 p.u.。计算各支路断开限流灵敏度, 并依照灵敏度大小对系统进行内外部划分, 以排除开断线路对超标点限流效果不理想的支路。在图 7 中将外部待等值区域分为三部分并用虚线隔开, 图 8 为采用动态 REI 等值后系统网络, 可见在开断线路限流策略中应用等值技术将大幅缩减模型规模, 等值后系统保留节点 22 个, 支路 26 条。

对等值后系统进行支路限流灵敏度分析, 结果如表 2 所示。表中给出了对各超标站点影响较大的 6 条候选支路, 支路遵照系统综合限流灵敏度大小降序排列。为保证系统不失稳, 发电机与系统的连接线不考虑在可断线路中。表 3 为这 6 条候选支路的具体限流效果, 可以看出在保持单支路开断情况下, 不足以使三个超标站点同时下降到短路电流超标门槛以下, 为满足安全要求此时应增加开断回路数。

- HUI Jianfeng, QIAN Yiwei, ZHANG Shixue. Study on short circuit current over-limitation of Shaanxi Power Grid in 2010[J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(1): 26-29.
- [3] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
RUAN Qiantu. The situation and countermeasures of short-circuit current control in Shanghai power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 78-83.
- [4] 黄根, 罗滇生, 李帅虎, 等. 基于综合灵敏度分析限流的最优断线措施[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 309-315.
HUANG Gen, LUO Diansheng, LI Shuaihu, et al. Optimal line-outage measure based on comprehensive sensitivity analysis to limit short-circuit current[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 309-315.
- [5] 艾琳, 冯艳虹, 陈为化, 等. 特高压接入京津冀北 500 kV 电网短路电流问题及限流措施研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 133-137.
AI Lin, FENG Yanhong, CHEN Weihua, et al. Research on short-circuit current problem and limiting measures caused by UHV substation connecting to 500 kV network in Beijing-Tianjin Area and Northern Hebei[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 133-137.
- [6] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-144, 151.
HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 141-144, 151.
- [7] 张永康, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 限制 500 kV 电网短路电流的网架调整优化算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 34-39.
ZHANG Yongkang, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. An optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV Power Grid by adjusting power grid configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 34-39.
- [8] 孙奇珍, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 500 kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 92-96.
SUN Qizhen, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. A short-circuit current over-limited mechanism of 500 kV power system and the adaptability of limiting measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 92-96.
- [9] 楼霞薇. 基于 ward 等值的限流措施优化配置方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [10] 翁华, 徐政. 一种考虑短路电流指标的动态等值方法 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 85-89, 100.
WENG Hua, XU Zheng. Dynamic equivalence based on short circuit current index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 85-89, 100.
- [11] 刘志文, 刘明波, 夏文波. 采用两种外部等值技术的多区域无功优化并行算法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 56-61, 66.
LIU Zhiwen, LIU Mingbo, XIA Wenbo. Comparison of multi-area reactive power optimization parallel algorithms using two kinds of external equivalent technique[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 56-61, 66.
- [12] 武艳, 张莉莉, 阎光鹏, 等. 电网等值中 CSR 法与 REI 法准确性研究[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2012, 12(3): 39-41.
WU Yan, ZHANG Lili, YAN Guangpeng, et al. Research on the accuracy using the method CSR and the method REI to simplify the power lines[J]. Journal of Langfang Teachers College (Natural Science Edition), 2012, 12(3): 39-41.
- [13] 邵玉槐, 李肖伟, 程晋生. REI 等值法用于多节点配电系统短路电流计算的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 65-68, 89.
SHAO Yuhuai, LI Xiaowei, CHENG Jinsheng. Studies on applying REI method to computing short-circuit fault current of distribution system of many nodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 65-68, 89.
- [14] 杜治, 苏宇, 彭昌勇, 等. 基于多层次启发式动态规划算法的电力系统动态等值[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 1-9.
DU Zhi, SU Yu, PENG Changyong, et al. Dynamic equivalent of power system based on global representation heuristic dynamic programming algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 1-9.
- [15] 谢仕炜, 胡志坚, 吴方劼, 等. 基于递推最小二乘法的多端口外网静态等值参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 26-34.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WU Fangjie, et al. Static equivalent parameter identification method of multi-port external network based on recursive least squares algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 26-34.
- [16] 西安交通大学. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- [17] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2006: 3-4.
- [18] 陈翔, 刘天琪, 李兴源, 等. 惯性常数对交直流互联系统强弱的评估[J]. 华东电力, 2011, 39(12): 1993-1997.
CHEN Xiang, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Strength evaluation by inertia constant for AC-DC interconnected system[J]. East China Electric Power, 2011, 39(12): 1993-1997.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw Hill, 1994.

收稿日期: 2017-04-01; 修回日期: 2017-06-30

作者简介:

惠宇翔(1993-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定及继电保护; E-mail: 304324055@qq.com

黄景光(1968-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为信号分析及电力系统继电保护。

(编辑 张爱琴)