

采用多目标离散粒子群算法的地磁感应电流抑制措施的优化和效果评价

刘青, 查虹丽, 马龙雄, 周宁馨

(西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安)

摘要: 针对传统电容隔直措施抑制地磁感应电流(GIC)存在风险转移以及目前优化目标的单一性,提出了基于多目标离散粒子群算法的电阻抑制措施优化方法以及考虑暂态量变化的评价指标。以地磁感应电流的 Benchmark 标准算例为例,将各电压等级变压器中性点 GIC 低于限值作为约束条件,电阻装置数最少和中性点 GIC 总和最少作为优化目标,获得了抑制措施的优化方案。基于标准算例在 Powerworld 中的动态模型,研究了不同时变感应地电场作用下电网暂态量的变化规律。利用发电机无功剩余量、母线电压偏移量和电压暂降时间作为评价指标,分析了优化方案的效果。结果表明:对于相同的 3 台装置,相比于电容隔直措施导致的风险转移,电阻优化方案可使抑制装置的数量和电网 GIC 达到全局最优,各变电站节点的 GIC 均在各自限值以下,全网 GIC 降至限值 384 A 以下;动态模型下,系统受地磁扰动影响时,电阻方案能够减小发电机无功出力,在 1 V/km 的电场下,未治理的无功剩余量从原来超出最大出力的 3 倍降至剩余量为限值的 20%,电阻方案能够维持节点电压稳定,节点电压最大偏移量从 39.73%降低至 13.68%,电压暂降最大持续时间从 1.2 s 降至 0.8 s,系统抵抗扰动的能力提高,暂态响应评价指标说明了电阻方案的有效性。

关键词: 地磁感应电流;电阻;多目标离散粒子群算法;评价指标

中图分类号: TM721 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202103011 **文章编号:** 0253-987X(2021)03-0090-09



OSID 码

Optimization of Geomagnetically Induced Current Suppression Based on Multi-Objective Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm and Effect Evaluation

LIU Qing, ZHA Hongli, MA Longxiong, ZHOU Ningxin

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at risk transfer of the traditional capacitor blocking device in suppressing geomagnetically induced current (GIC), and the single optimization goal, an optimization algorithm of the installation position of resistors based on multi-objective discrete particle swarm optimization and the evaluation indicators considering the change of transients are provided. Taking the GIC-Benchmark test case as an example, the neutral point GICs of each voltage level below the limit as the constraint conditions, the least number of resistor devices and the least neutral point sum GICs as the optimization objectives, the optimization scheme of suppression measures is proposed. The rule of transient changes due to different induced geoelectric fields is revealed based on the dynamic model of GIC-Benchmark in Powerworld. The generator reactive power output, bus voltage offset and voltage transient drop duration are chosen to evaluate the

effect of suppression measures. Compared with the capacitor, the resistor optimization makes the number of suppression devices and GIC values reach the global optimal. The GICs of each substation node is below their respective limit, and the entire grid GICs below the limit of 384 A. In the case of the dynamic model, when the system is disturbed, the resistor scheme reduces the reactive power output of the generator, lowers the reactive power reserve value from beyond 3 times of the maximum output to the rest value with 20% of the limit under the electric field with 1 volt every kilometer, and maintains the stability of the node voltage, the maximum offset of node voltage is reduced from 39.73% to 13.68%, and the maximum duration of voltage sag is also reduced from 1.2 s to 0.8 s. The resist disturbance ability of the system is promoted. The evaluation indicators of transient response verify the effectiveness of this resistor scheme.

Keywords: geomagnetically induced current; resistor; multi-objective discrete particle swarm optimization; evaluation indicator

地磁暴诱发的地磁扰动会在地中性点接地的交流电网中引起地磁感应电流(GIC)。准直流性质的GIC可能引起变压器直流偏磁,对设备及系统的安全运行产生影响,甚至引发大面积停电事故^[1-2]。中国电网发展迅速,具有电压等级高、网络规模大、交直流混联等特点,GIC可能会对电网导致严重的致灾风险,因此研究GIC的治理方法尤为重要。

关于电网GIC的抑制,多位学者做了大量的研究工作。文献[3-4]研究了电容隔直装置对GIC的抑制效果。针对电容隔直装置风险转移引起相邻变电站GIC增大的问题,文献[5-6]提出了小电阻抑制方法,对加装电阻后的GIC计算方法的效果进行了分析。文献[7]指出电阻限流器装置简单,对系统其他装置不会带来明显影响,并且系统对电阻装置的要求只有两个:电阻阻值一般在几欧姆左右;电阻对并联放电间隙、避雷器进行保护。

GIC抑制措施的安装位置选择是全局优化问题,最早多采用穷举法进行试验,比如在高风险节点、系统拐点处重点抑制。但是,对于节点较多的大电网,很难列举完所有方案,且计算效率较低。文献[8-9]以电容装置数量最少为单一目标进行智能优化,但忽略了其他条件的相互制约。文献[10-11]用多目标粒子群算法分别对GIC影响下无功补偿装置的安装位置以及直流接地极入地电流作用下电容隔直装置的安装位置进行了优化,能够一定程度上反映实际系统的优化目标之间的相互制约性,但二者分别只是与未治理的节点电压和未治理的直流量进行了比较,并未提出评价指标对所提方法进行验证。

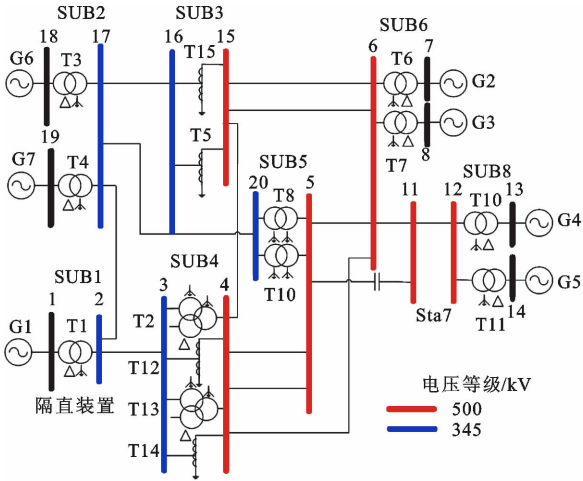
另外,以往多以均匀电场作用下的GIC衡量治理方案的效果,如文献[12]用关于GIC的4个指标评估治理方案的效果,但这些均是基于稳态GIC的

指标,且与目标函数有重复。为更全面地评价优化效果,本文研究时变电场下动态模型暂态量的变化规律,并提出3个指标对优化方案的效果进行评价。

综上所述,目前关于GIC的优化措施存在电容方案的风险转移和高成本、评价指标不够全面的问题。因此,本文针对这些问题,基于多目标离散粒子群算法,研究采用电阻限流装置的GIC抑制措施优化方案,并采用时变电场作用下能够反映暂态过程的多个指标对抑制效果进行评价。

1 传统隔直装置存在的问题

图1是地磁感应电流 Benchmark 标准算例的单线图。Benchmark 标准算例由美国电力科学院牵头、多国科学家合作提出,用来测试GIC算法,线路参数和节点参数详见文献[13]。



SUB1~SUB6, SUB8—变电站; G1~G7—发电机;
T1~T15—变压器; Sta7—开关站; 1~8, 11~19—母线编号。

图1 GIC-Benchmark 标准算例单线图

计算电网中的 GIC 主要有两个步骤^[14-15]:根据变电站的地理坐标计算出各变电站之间的等效距离,将感应地电场沿线路积分得到驱动 GIC 的等效电压源;建立考虑多电压等级的电网 GIC 全节点计算电路,采用基于电网节点导纳矩阵的电路求解方法求解 GIC。

假设某系统有 N 个节点, $\mathbf{I}_e(N \times 1$ 阶)为流入或流出接地节点的电流,则

$$\mathbf{I}_e = \mathbf{Z}_e^{-1} \mathbf{Y}_{\text{total}}^{-1} \text{diag}(\mathbf{V}_0 \mathbf{Y}_n) = (\mathbf{Y}_{\text{total}} \mathbf{Z}_e)^{-1} \text{diag}(\mathbf{V}_0 \mathbf{Y}_n) \tag{1}$$

式中: $\mathbf{Z}_e$ 为接地阻抗矩阵; $\mathbf{Y}_{\text{total}}$ 为网络导纳矩阵之和; $\mathbf{V}_0$ 为感应电压矩阵; $\mathbf{Y}_n$ 为导纳矩阵, n 为节点。节点 i 和 j 之间的电流为

$$I_{n,ij} = -(\mathbf{V}_{ij}^0 + \mathbf{U}_{m,ij}) \mathbf{Y}_{n,ij} \tag{2}$$

式中 $\mathbf{V}_{ij}^0$ 、 $\mathbf{U}_{m,ij}$ 和 $\mathbf{Y}_{n,ij}$ 分别为节点 i 、 j 之间的感应电压、电压差和导纳。

定义 $\mathbf{U}_m$ 和 $\mathbf{Y}_n$ 都为 N 阶方阵,将式(2)改写为矩阵形式

$$\mathbf{I}_n = -(\mathbf{V}_0 + \mathbf{U}_m) \mathbf{Y}_n \tag{3}$$

$\mathbf{I}_n$ 即为所求节点 GIC。

文献[16]规定三相三柱式的 GIC 限值应不超过变压器额定电流的 0.7%。文献[17]指出,对于 500 kV 变压器,如果直流作用时间不超过 30 min, 20 A 以下的直流电流将不会对变压器造成危害。本文计算选取 Benchmark 标准算例,500 kV 变压器的中性点单相允许直流量为 10 A,345 kV 变压器的中性点单相允许直流量为 8 A,整个电网所允许的直流限值总和为 384 A。GIC-Benchmark 各变电站内变压器信息 and 中性点单相允许直流电流如表 1 所示。

表 1 GIC-Benchmark 各变电站内变压器信息
和中性点单相允许直流电流

变电站	电压等级/kV	变压器类型	变压器数量	变压器运行方式	中性点单相允许直流电流/A
SUB1	345	普通	1	单台	8
SUB2	345	普通	2	2 台并联	8
SUB3	345	自耦	2	2 台并联	8
SUB4	345	普通或自耦	4	4 台并联	8
SUB5	345	普通	2	2 台并联	8
SUB6	500	普通	2	2 台并联	10
SUB8	500	普通	2	2 台并联	10

为了说明电容隔直装置存在的问题,此处采用

感应地电场强度 $E=0.5$ V/km 的均匀电场分析两种抑制方案。方案 1 为高风险节点优先安装,根据 GIC 计算结果在 GIC 较大的 SUB6 和 SUB8 安装电容隔直装置。方案 2 为超标就安装,隔直装置安装位置为 SUB5、SUB6、SUB8。

图 2 对比了未治理、方案 1 和方案 2 这 3 种情况下各变电站对地 GIC 的绝对值,即 $|I_{\text{GIC}}|$ 。图中圆圈大小表示该站点 GIC 的大小,虚线框表示 GIC 被动升高的站点。

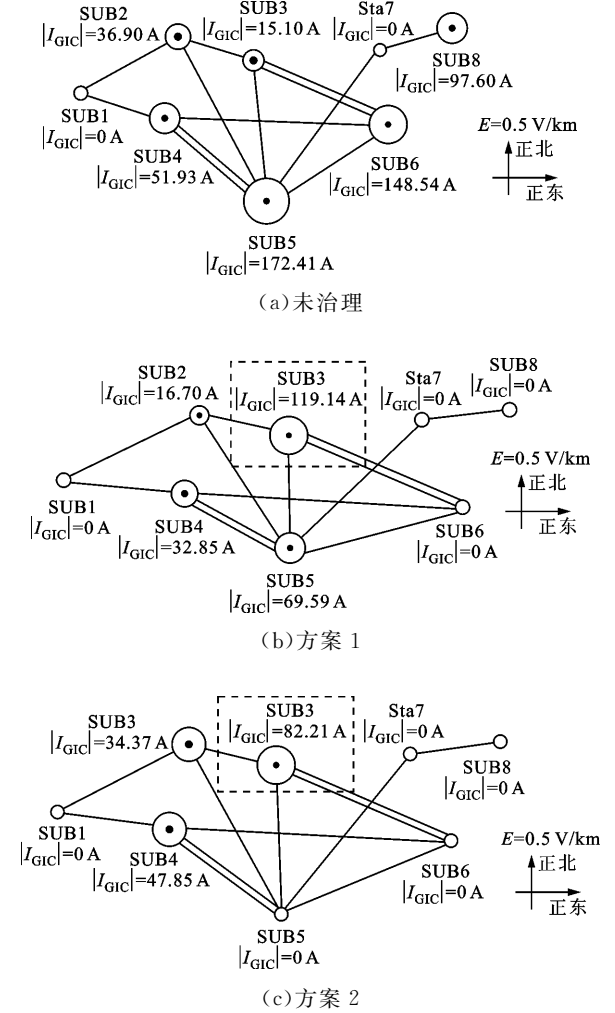


图 2 3 种情况下变电站对地 GIC 分布

从图 2 可以看出,虽然两种方案都阻断了安装隔直装置变电站的 GIC,但却导致周边的 SUB3 的 GIC 比未采取抑制措施时大幅增加。本文采用中性点串联电阻的方案抑制 GIC,提出基于多目标离散粒子群算法的电阻优化方案。

2 电阻措施的优化模型及结果分析

2.1 优化模型

本文对变压器中性点串联电阻的方案进行优

化,约束条件为各变电站中性点 GIC 小于直流限值,优化目标为限流装置数量最少以及全网变压器中性点 GIC 总和最小,优化模型为

$$\left. \begin{aligned} \min\{f_1, f_2\}, f_1 = \sum(x_i), f_2 = \sum_{i=1}^7 I_{\text{GIC}}(i) \\ \text{s. t. } \begin{cases} I_a \leq 8 \text{ A} \\ I_b \leq 10 \text{ A} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: f_1 和 f_2 为待优化的两个目标; x_i 为电阻装置的安装位置,是一串 7 位的 0-1 序列,0 表示不安装,1 表示安装, $i=1,2,\dots,7$ 为节点编号; $\sum(x_i)$ 为 x_i 这 7 位 0-1 序列中 1 的数量之和,即需要安装的装置数量; I_a 和 I_b 分别为 345 kV 和 500 kV 电压等级下的直流限值。两个目标相互制约,其中一个目标达到最优的同时会导致另一个目标成为不好的解甚至是最坏的解。因此,需要在满足两个目标的所有解集中选取不坏的解或者 Pareto 最优解^[18]。

对于 a 、 b 两个个体,如果 a 的所有目标都不比 b 的差,并且 a 至少有一个目标比 b 的好,那么 a 支配 b ,或者 a 非劣于 b 。Pareto 最优解定义为:对于最小化多目标问题, n 个目标分量 $f_i (i=1,\dots,n)$ 组成的向量为 $\mathbf{F}(x)=[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$,当且仅当 a 非劣于 b ,且不存在另一个决策变量 b 使 $F(b)$ 支配 $F(a)$ 时,决策变量 a 为 Pareto 最优解。

2.2 多目标离散粒子群算法的计算流程

根据优化目标和多目标之间的 Pareto 支配关系,利用多目标离散粒子群算法进行优化计算。

为了让适应度越大的粒子越容易寻优,将关于电阻限流装置数量和变压器中性点 GIC 总和的适应度函数用目标函数的倒数形式进行计算

$$F_1(i) = 1/\sum(x_i) \quad (5)$$

$$F_2(i) = 1/\sum_{i=1}^7 I_{\text{GIC}}(i) \quad (6)$$

初始筛选非劣解集是指初始化后,某粒子不受其他粒子支配时,将其放入初始非劣解集中,并在更新前从非劣解集中选一个粒子作为群体最优粒子;更新非劣解集是指新粒子不受其他粒子或当前非劣解集中粒子的支配时,将新粒子放入非劣解集中,每次粒子更新前都从非劣解集中随机选择一个粒子作为最优粒子。

群体中的每一个粒子更新和调整自己的速度和位置,公式为

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1(t)[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \\ c_2 r_2(t)[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$X_{ij}(t+1) = X_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (8)$$

式中: ω 为惯性权重,防止算法早熟收敛; c_1 、 c_2 为学习因子,表示粒子速度转向的偏好程度,均取为 1.5; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 区间上的随机数,增加了粒子飞行的随机性; v_{ij} 为第 i 个粒子在第 j 维搜索空间的飞行速度, $v_{ij} \in [-10,10]$; X_i 为第 i 个粒子的当前位置, $i=1,2,\dots,N$; p_{ij} 为第 i 个粒子在第 j 维搜索空间经历的最优位置; p_{gj} 为整个群体在第 j 维搜索空间经历的最优位置。算法的终止条件为迭代过程中取得最大的适应度,即获得粒子群最佳位置。

装置的安装数量和安装位置是离散问题,因此采用离散化思想,对变电站节点进行二进制(0-1)编码,0 表示不安装,1 表示安装,粒子按照适应度函数进化的方向寻优,最终 1 的数量就是需要安装限流装置的数量,1 的位置就是限流装置安装的位置。位置更新等式为

$$s(v_{ij}) = 1/(1 + \exp(-v_{ij})) \quad (9)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & r < s(v_{ij}) \\ 0, & r \geq s(v_{ij}) \end{cases} \quad (10)$$

式中 r 是从 $[0,1]$ 的均匀分布中产生的随机数。

为了使算法不陷入局部最优解,本文在算法中利用了带惯性策略的计算公式^[19]

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{T_{\max}} t \quad (11)$$

式中: $\omega_{\max}=0.9$ 为最大权重; $\omega_{\min}=0.4$ 为最小权重; $T_{\max}$ 为最大进化代数; t 为当前迭代次数。

计算开始时使用较大的惯性权重保证算法在全局范围内探测到较好的区域,后期使用较小的惯性权重保证算法在极值点周围做精细的搜索,从而增大收敛于全局最优解的概率。多目标离散粒子群算法的流程如图 3 所示。

粒子数为 50,最大迭代数为 100。感应电场 E 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内旋转,强度为 0.5 V/km。若电场与正东方向的夹角为 α ,则电场在正东和正北方向上的分量为

$$E_E = E \cos \alpha; E_N = E \sin \alpha \quad (12)$$

文献[20]规定,电阻型限流装置阻值一般不超过 3.5 Ω 。本文计算中电阻为 3 Ω ,在目标函数的计算程序中将接地电阻公式加上相应的限流电阻值,关联矩阵保持不变。在优化程序中调用目标函数,计算各变电站节点每一角度下的 GIC,并判断每个变电站的 360 个 GIC 是否都小于各变电站节点的 GIC 限值。如果小于限值,则不需要安装电阻限流装置,反之则安装,直至所有节点每一角度下的 GIC

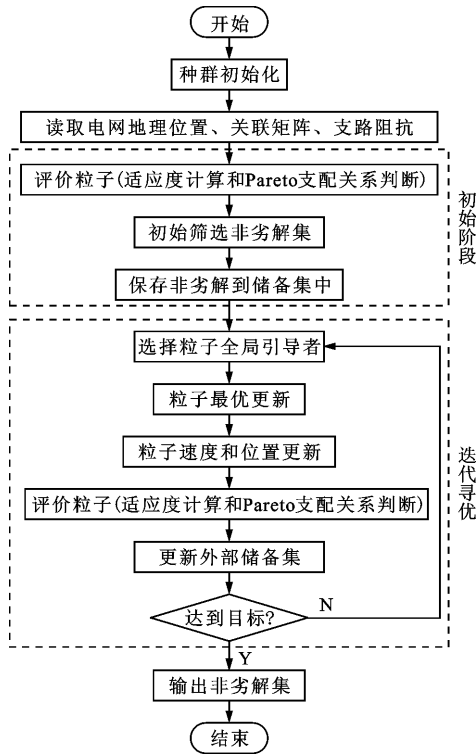


图 3 多目标离散粒子群算法流程

都在直流限值以内。

2.3 优化结果及分析

多次运行程序,电阻限流装置数和变压器中性点 GIC 总和随迭代数的变化如图 4 所示。可以看出,电阻限流装置数和中性点 GIC 总和呈反比,最终装置数收敛于 3,GIC 总和收敛于 223.11 A。

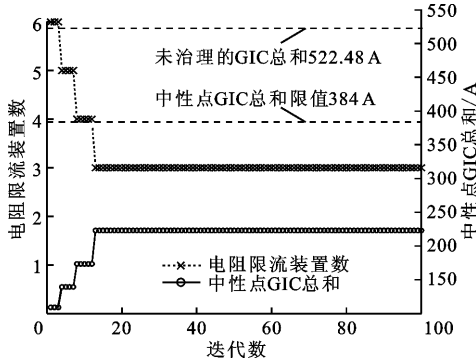


图 4 电阻限流装置数和变压器中性点 GIC 总和随迭代次数的变化

计算得到两个目标函数的 Pareto 最优解,如图 5 所示。实线表示 Pareto 最优解的变化趋势,阴影区域内为可行解,可行解的两个目标函数无法同时满足非劣。从变化趋势可以看出,两个目标函数满足双目标函数最小化的规律,一个目标函数增大势必会造成另一个目标函数的减小。点 A、B、C、D 均为 Pareto 最优解,这 4 个解的两个目标之间互不支

配、互不占优,并且可以支配阴影面内的任何一点。当电阻限流装置数为 1、2 时,虽然 GIC 总量分别为 377.06、271.67 A,都在限值以下,但是未满足算法的约束条件,因此这两个解也仅属于可行解。算法约定首先满足电阻限流装置的数量最少,因此 A 点为最终解,即在 SUB5、SUB6、SUB8 安装电阻限流装置, I_{GIC} 分别为 0、42.5、48、55.6、13.6、20.9、42.51 A, I_{GIC} 总和为 223.11 A。

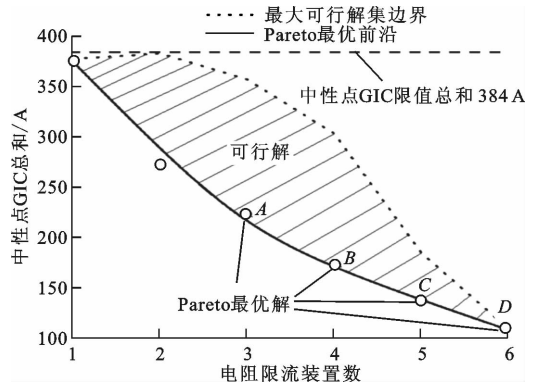


图 5 两个目标函数的 Pareto 最优解

图 4 和图 5 表明,GIC-Benchmark 电网在 0.5 V/km 的地电场作用下,最少需要 3 台电阻限流装置,才能将各个变电站在每一角度下的 GIC 限制在可承受的直流量内,并且 GIC 总和最小。

旋转电场在变电站和输电线路中产生的 GIC 具有一定的对称性,电场方向与线路走向夹角越小则 GIC 越大^[21]。由于本算例和正东向、正北向的夹角为 0°时产生的 GIC 最大,因此这里只分析正东和正北电场产生的 GIC 总和的治理效果。GIC-Benchmark 在 0.5 V/km 的电场作用下,未治理、传统电容方案和电阻优化方案的中性点 GIC 总和如图 6 所示,图中 GIC 均为三相绝对值。可以看出:两种电容治理方案都会使 SUB3 的 GIC 超标,这是

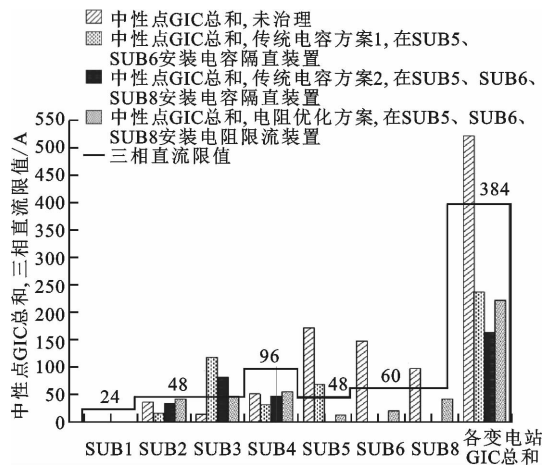


图 6 $E=0.5$ V/km 时不同治理方案下的 GIC 总和

风险转移的结果;采用电阻优化方案治理后,电网中所有变电站的 GIC 均在可承受范围内,可达到全局最优。

3 电阻优化方案的效果评价

3.1 变化电场下暂态响应的规律研究

为了进一步对比传统电容和电阻优化两种抑制方案在变化电场作用下对 GIC 的抑制效果,选择传统隔直方案中的方案 2(在 SUB5、SUB6、SUB8 安装电容隔直装置)和电阻限流优化方案,与未治理的

GIC 进行比较验证。在 Powerworld Simulator 软件中建立 Benchmark 标准算例模型,如图 7 所示。图中:G1 为平衡机,单位为 MV 的量为有功功率,单位为 MV·A 的量为无功功率,各发电机功率范围如表 2 所示。部分暂态参数如下^[22]:交轴同步电抗 $X_q=0.5\ \Omega$;直轴同步电抗 $X_d=2.1\ \Omega$;交轴暂态电抗 $X_{qp}=0.5\ \Omega$;直轴暂态电抗 $X_{dp}=0.2\ \Omega$;直轴次暂态电抗 $X_{dpp}=0.18\ \Omega$;暂态开路时间常数 $T_{dop}=7.0\ \text{s}$, $T_{qop}=0.75\ \text{s}$;暂态短路时间常数 $T_{dopp}=0.035\ \text{s}$, $T_{qopp}=0.05\ \text{s}$ 。

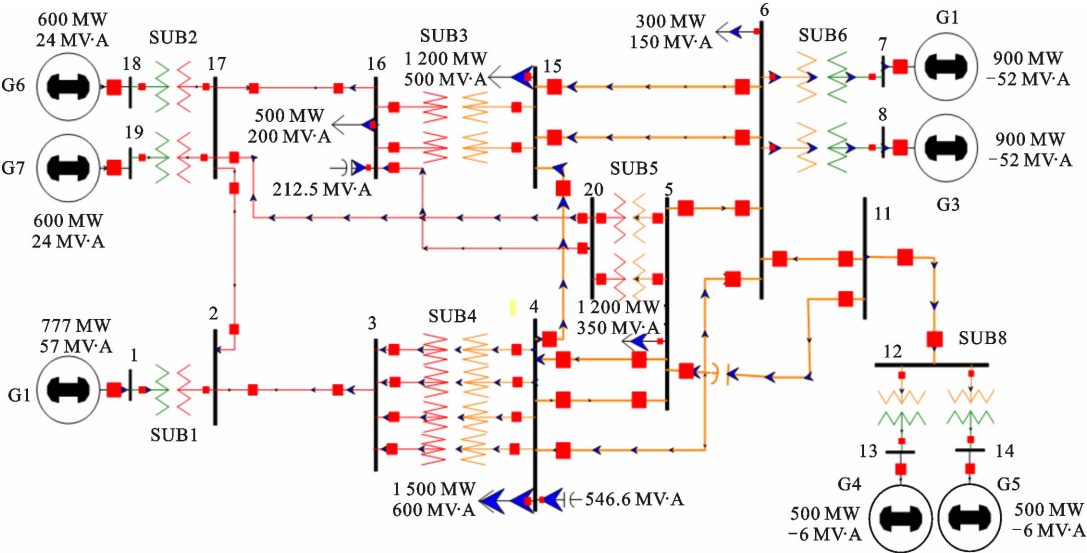


图 7 Powerworld Simulator 软件中建立的 Benchmark 仿真电路

表 2 发电机功率范围

发电机	有功功率范围/MW	无功功率范围/(MV·A)
G1	0~1 000	-350~500
G2,G3	0~900	-350~400
G4,G5	0~500	-200~225
G6,G7	0~800	-300~400

为了与第 2 节的分析条件保持一致,基于线路和电场之间的夹角为 0°时产生最大 GIC 的事实,设置地电场方向为正东方向(北向同理),在第 0 s 开始作用,考虑 3 种地磁扰动情况:①E 在 1 s 内从 0 增加到 1 V/km;②E 在 2 s 内从 0 增加到 1 V/km;③E 在 1 s 内从 0 增加到 0.5 V/km。

治理前,为了得出不同变化率的 E 对暂态响应的影响,在情况①②③下计算发电机无功出力 and 母线电压变化,选择平衡机 G1 和母线 2 的暂态响应规律研究。对比情况①③得到图 8 和图 9,对比情况①②得到图 10 和图 11。从图 8~11 可知:在感应地电场影响下,发电机母线电压迅速下降,最低可

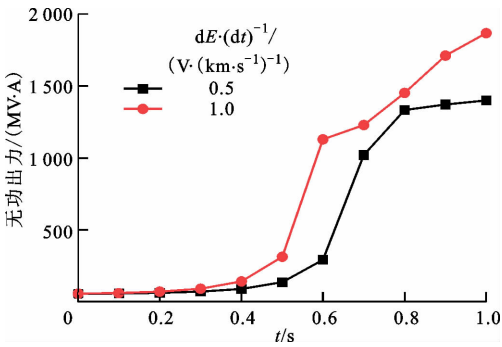


图 8 情况①和③下的 G1 无功出力

至 0.63(标么值),低于 0.95(标么值)的持续时间约为 1.2 s;平衡机 G1 在受到扰动时为调节整个电网的无功出力,会大幅增加自身的无功输出,电场强度越大、变化率越大,则发电机无功出力越多,超出限值时刻越早。

情况③下 3 种方案的发电机无功出力、母线电压响应如图 12 和图 13 所示。可以看出:在未治理和电容治理时,发电机 G1 都超出了无功出力限值,采用电容治理超出限值的时刻更早,验证了个别节

点经电容治理后会导致风险转移;采用电阻优化治理后,所有发电机的无功出力均在限值以内;采用电阻治理方案,母线 2 电压降幅最小,且跌落至低于 0.95(标么值)的时间最短。

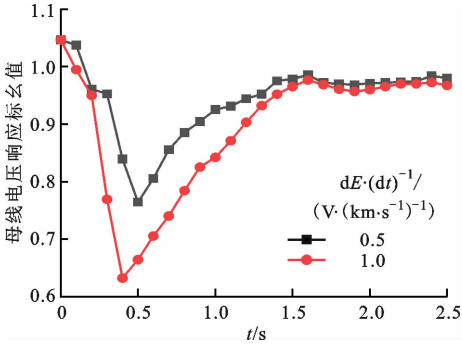


图 9 情况①和③下母线 2 的电压响应

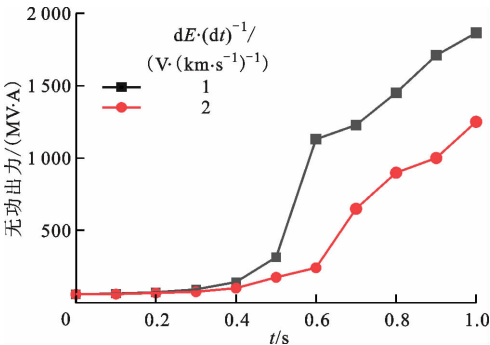


图 10 情况①和②下 G1 的无功出力

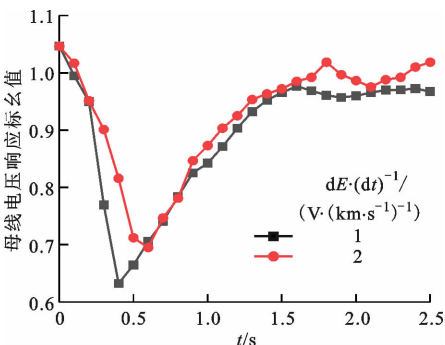


图 11 情况①和②下母线 2 的电压响应

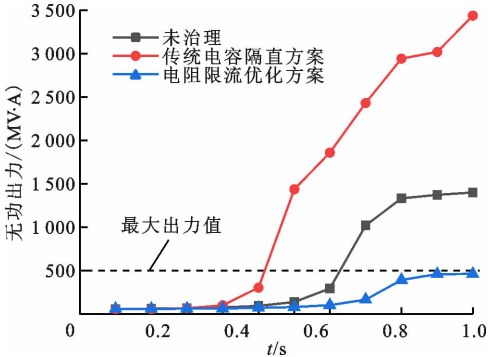


图 12 3 种方案下 G1 的无功出力

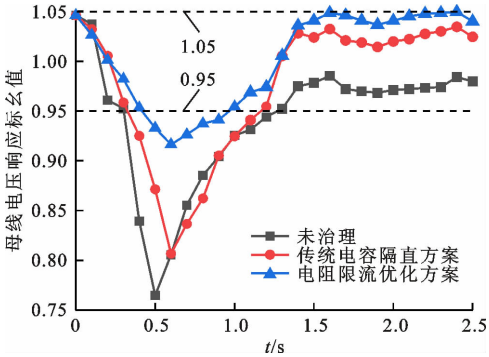


图 13 3 种方案下母线 2 的电压响应

3.2 优化方案的效果评价指标

(1)发电机无功剩余量 Q_{rest} 。发电机的无功出力会在磁暴来临时瞬时增大,无功储备剩余量减小。因此,用发电机无功剩余量指标 Q_{rest} 判断系统无功储备的充裕性。 Q_{rest} 公式为

$$Q_{rest} = Q_{lim} - Q_{max} \tag{13}$$

式中: Q_{lim} 为发电机无功储备的限值; Q_{max} 为暂态过程中无功出力的最大值。

3 种方案下的发电机无功剩余量如表 3 所示,正值代表剩余量,负值代表超标量。可以看出:随着电场强度的增大,发电机无功出力增大,剩余量减小;在 1 V/km 的电场作用下,平衡机在未治理时无功出力大幅增加,超出无功限值 1 366.21 MV·A,

表 3 3 种方案下的发电机无功剩余量

$dE \cdot (dt)^{-1} / (V \cdot (km \cdot s^{-1})^{-1})$	治理方案	$Q_{rest} / MV \cdot A$			
		G1	G2,G3	G4,G5	G6,G7
0.5	未治理	-900.14	-49.46	26.94	216.91
	电容治理	-2 939.58	14.51	-29.98	246.27
	电阻治理	39.98	199.64	64.68	306.23
1.0	未治理	-1 366.21	-112.39	-32.73	8.05
	电容治理	-3 285.43	-99.47	-68.69	127.01
	电阻治理	101.07	35.39	50.75	155.69

几乎为无功限值的 3 倍,电容治理比未治理的无功出力超标更多;所有发电机经电阻优化治理后出力均在限值以内。若电场强度进一步增加,可能导致某些发电机因无功储备不够而造成机端电压下降,因此暂态指标值得进一步关注。

(2)节点电压偏移指数 U_{offset} 。地磁暴会造成节点电压下降,节点电压偏移指数定义为

$$U_{\text{offset}}(i) = \frac{|U_{\text{max}}(i) - U_e(i)|}{U_e(i)} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $U_{\text{max}}(i)$ 为节点电压下降的最大值; $U_e(i)$ 为电压额定值; i 为节点编号。 $U_{\text{offset}}(i)$ 越大说明该节点电压偏移越严重,系统越不稳定。

3 种方案下母线 2 的电压偏移如表 4 所示,可以看出:电场强度越大,则节点电压偏移越严重,电压暂降幅值越大,系统稳定性越易受到威胁;经电阻优化治理后,电压偏移减小。

表 4 3 种方案下母线 2 的电压偏移

$dE \cdot (dt)^{-1} / (V \cdot (km \cdot s^{-1})^{-1})$	治理方案	最大降幅时刻/ s	$U_{\text{offset}} / \%$
0.5	未治理	0.5	27.18
	电容治理	0.6	23.17
	电阻治理	0.6	12.70
1.0	未治理	0.4	39.73
	电容治理	0.5	28.89
	电阻治理	0.6	13.68

(3)节点电压暂降持续时间 T_{sag} 。 T_{sag} 为母线电压低于 0.95(标么值)的持续时间,持续时间越长说明暂降越严重。 T_{sag} 定义为

$$T_{\text{sag}} = t_2 - t_1 \quad (15)$$

式中 t_1 和 t_2 为母线电压与 0.95(标么值)的交点。

3 种方案下母线 2 的电压暂降持续时间如表 5 所示,可以看出:电场强度越大,节点电压暂降持续时间越长,系统越不稳定;两种电场变化情况下,暂降时间从长到短依次为未治理、传统电容治理、电阻

表 5 3 种方案下母线 2 的电压暂降持续时间

$dE \cdot (dt)^{-1} / (V \cdot (km \cdot s^{-1})^{-1})$	治理方案	$T_{\text{sag}} / \text{s}$
0.5	未治理	1.0
	电容治理	0.9
	电阻治理	0.6
1.0	未治理	1.2
	电容治理	1.1
	电阻治理	0.8

优化治理,说明电阻优化治理方案有效,系统更易恢复稳定状态。

4 结 论

(1)对于 GIC-Benchmark 采用传统电容隔直方案抑制 GIC,结果表明,无论是高风险节点安装电容或者越限就安装电容,都不可避免地会导致 GIC 风险转移,因此有必要对抑制措施进行优化配置。

(2)计算得到在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 旋转、0.5 V/km 的均匀电场作用下的 Pareto 最优解,最少需要 3 台电阻限流装置才能将每个变电站超标的 GIC 降至安全范围内,且 GIC 总量最小,为 223.11 A。

(3)对采取基于多目标离散粒子群算法的电阻方案的 Benchmark 电网进行了暂态分析,结果表明:在 1 V/km 电场作用下,未治理时,发电机无功出力从超出无功限值的 3 倍降低至剩余量为限值的 20%;节点电压偏移指数最少降低了 40%;电压暂降持续时间下降了 30%以上;对 0.5 V/km 电场扰动的改善效果更为明显。电阻优化方案可行且有效。

参考文献:

[1] 李新洁,王冬辉,刘春明. 地磁暴对电力系统的影响及防治策略 [J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(7): 070016.
LI Xinjie, WANG Donghui, LIU Chunming. Influence of geomagnetic storms on power system and suppressing measures [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(7): 070016.
[2] 文俊,刘连光,项颂,等. 地磁感应电流对电网安全稳定运行的影响 [J]. 电网技术, 2010, 34(11): 24-30.
WEN Jun, LIU Lianguang, XIANG Song, et al. Influences of geomagnetic induced currents on security and stability of power systems [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 24-30.
[3] 刘春明,黄彩臣,林晨翔. 抑制变压器地磁感应电流的电容隔直装置安装位置优化 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 132-137.
LIU Chunming, HUANG Caichen, LIN Chenxiang. Installation position optimization of capacitor DC blocking devices for suppressing geomagnetically induced currents in transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 132-137.
[4] 黄彩臣. 抑制变压器直流偏磁电容隔直装置的优化配置研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 24-30.
[5] 赵振华. 基于均摊电网 GIC 的地磁暴灾害防治技术研

- 究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 32-39.
- [6] 刘连光, 杨培宏, 马成廉, 等. 中性点串接小电阻均摊电网 GICs 的计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3108-3117, 3366.
- LIU Lianguang, YANG Peihong, MA Chenglian, et al. Calculation method for allocating averagely GICs of power grid by placing small resistor in neutral-point [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3108-3117, 3366.
- [7] 国家能源局. 电力变压器中性点直流限(隔)流装置技术规范: DL/T 1541—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 3-4.
- [8] 刘春明, 林俊岑, 王璇, 等. 抑制电网地磁感应电流的电容电阻优化布置方法 [J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1681-1686.
- LIU Chunming, LIN Juncen, WANG Xuan, et al. An optimal layout method of capacitances and resistances for suppressing geomagnetically induced currents in power grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1681-1686.
- [9] NING Xiaoliang, LIU Qing, CUI Xikai, et al. Research on optimal placement for GIC mitigation with blocking device [C]// Proceedings of the 2019 5th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics. Bristol, UK: IOP, 2019: 012042.
- [10] 杨培宏, 刘连光, 刘春明, 等. 基于粒子群优化算法的电网 GIC-Q 多目标优化策略 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 93-99.
- YANG Peihong, LIU Lianguang, LIU Chunming, et al. Multi-objective optimization strategy based on PSO algorithm for GIC-Q of power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 93-99.
- [11] 宋雨妍, 王渝红, 刘天宇, 等. 基于多目标离散粒子群算法的电容隔直装置优化配置 [J]. 电网技术, 2019, 43(1): 266-274.
- SONG Yuyan, WANG Yuhong, LIU Tianyu, et al. Optimal configuration of capacitor blocking devices based on multi-objective discrete PSO [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 266-274.
- [12] 杨培宏, 郑许朋, 刘连光, 等. 变压器中性点配置小电阻器对治理电网 GIC 的效果分析 [J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1324-1331.
- YANG Peihong, ZHENG Xupeng, LIU Lianguang, et al. Effects of transformer neutral grounding via small resistor on mitigating geomagnetically induced currents in power grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1324-1331.
- [13] HORTON R, BOTELER D, OVERBYE T J, et al. A test case for the calculation of geomagnetically induced currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2368-2373.
- [14] 郑宽, 刘连光, BOTELER D H, 等. 多电压等级电网的 GIC-Benchmark 建模方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 179-186, 3.
- ZHENG Kuan, LIU Lianguang, BOTELER D H, et al. Modelling geomagnetically induced currents in multiple voltage levels of a power system illustrated using the GIC-benchmark case [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 179-186, 3.
- [15] LEHTINEN M, PIRJOLA R. Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically induced electric fields [J]. Annales Geophysicae, 1985, 3(4): 479-484.
- [16] 国家能源局. 高压直流输电大地返回系统设计技术规范: DL/T 5224—2014E [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014: 28-29.
- [17] 姚纛英. 大型电力变压器直流偏磁现象的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2000: 115-116.
- [18] 胡旺, YEN G G, 张鑫. 基于 Pareto 熵的多目标粒子群优化算法 [J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1025-1050.
- HU Wang, YEN G G, ZHANG Xin. Multiobjective particle swarm optimization based on Pareto entropy [J]. Journal of Software, 2014, 25(5): 1025-1050.
- [19] 包子阳, 余继周, 杨杉. 智能优化算法及其 MATLAB 实例 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2018: 114-115.
- [20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力变压器: 第 23 部分 直流偏磁抑制装置: GB/T 1094.23—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 3.
- [21] 刘青, 韩康康, 徐婷, 等. 新疆 2020 年规划电网地磁感应电流的分布规律及敏感性分析 [J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3678-3684.
- LIU Qing, HAN Kangkang, XU Ting, et al. Analysis of distribution regularities and sensitivity of geomagnetically induced currents in planned Xinjiang 750 kV power grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3678-3684.
- [22] TREVOR H. Modeling, simulation, and mitigation of the late time (E3) high-altitude electromagnetic pulse on power systems [D]. Urbana, IL, USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016: 80.

(编辑 陶晴)