

基于粒子群优化算法的电网 GIC-Q 多目标优化策略

杨培宏^{1,2}, 刘连光¹, 刘春明¹, 冯士伟², 郑许朋²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 地磁感应电流(GIC)流经变压器绕组会产生直流偏磁现象,造成变压器无功损耗增加,破坏电网无功平衡,影响电网安全稳定运行。为了有效地抑制 GIC 对电网的不良影响,以无功补偿设备成本和电压偏移量最小为目标,提出一种基于粒子群优化算法的多目标无功优化策略,保证地磁场扰动下电网无功平衡。所提策略利用小生境共享机制不断更新粒子位置,并依据拥挤距离排序对 Pareto 最优解进行存档,保持解的多样性和均匀性;引入混沌变异避免陷入局部最优解,同时提高全局搜索能力。GIC 标准算例的仿真结果验证了所提策略的准确性和有效性。

关键词: 地磁场扰动; 地磁感应电流; 无功优化; 电压偏移; 多目标优化; 小生境; 粒子群优化算法; 混沌变异; Pareto 最优

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.016

0 引言

太阳剧烈活动朝向地球时会引起全球地磁场扰动 GMD(GeoMagnetic Disturbance)即地磁暴,GMD 在输电线路、两端接地变压器与大地构成的回路产生地磁感应电流 GIC(Geomagnetically Induced Current)^[1],GIC 引起变压器直流偏磁饱和进而导致变压器温升过高、无功消耗增大和高次谐波过大,严重时造成变压器损毁或电网大停电事故^[2]。1989 年魁北克大停电事故之后,Barnes P. R. 指出,造成魁北克大停电的诱因就是 GIC 引起变压器的无功功率增多,同时谐波的存在使得电容器组被迫退出,导致无功不平衡从而引发电压崩溃^[3]。1992 年 5 月 10 日地磁暴期间,美国 EPRI 公司对某变电站 345 kV/115 kV 变压器的监测数据表明,GIC 引起的变压器无功损耗非常大^[4]。地磁暴在全球范围内几乎同时发生,因此变压器的 GIC 无功(GIC-Q)损耗具有全网群发性、突发性等特点,电网变压器数量多,群发的 GIC-Q 损耗总量很大,很容易造成电网电压降落,从而使电压稳定性问题变得突出^[5]。

魁北克大停电事故发生后,很多国家针对变压器的 GIC-Q 效应及 GIC-Q 间的数量关系展开了研究,文献[6]揭示了变压器 GIC-Q 损耗的机理;文献[7]通过实验仿真和现场数据指出变压器无功损耗

与 GIC 呈线性关系;文献[8]通过有效电纳推导出变压器吸收无功功率与 GIC 呈线性关系;文献[9]提出利用变压器制造厂家的 $U-I$ 曲线和铁芯材料 $\psi-I$ 曲线计算变压器 GIC-Q 的数量关系,得到了 GIC 与变压器无功损耗呈线性关系的结论。上述研究成果揭示了 GIC-Q 损耗机理及数量关系,明确了一定的 GMD 强度下电网无功损耗的分布情况,为电网无功优化控制、电压稳定分析以及电压失稳风险评估提供基础。

GMD 作为一种自然现象将会持续发生,随着我国电网规模的不断扩大,特别是特高压电网的大规模建设以及单相自耦变压器的普遍应用,这些因素更会增加电网遭受 GIC 侵害的可能性^[10],造成电网 GIC-Q 波动范围更广、影响程度更深。因此,电力部门要对 GMD 做出合理的防御措施,深入研究 GIC-Q 波动的治理方案。在中性点安装补偿装置能够有效治理 GMD 引起的无功波动^[11],但是中性点安装补偿装置是否会对电力系统的稳定性造成影响仍需进一步研究,因此充分利用现有无功补偿设备,通过调度合理配置与优化是防御 GIC 引发无功波动的有效措施。

然而,通过调度部门进行 GIC-Q 防御的前提是能够有效预报太阳风暴。为此,自 1989 年太阳风暴造成魁北克地区电网停电后,太阳风暴预报得到了高度重视^[12]。1997 年 8 月发射的高级成分探险者(ACE)卫星,其专门在日地引力平衡点上监测太阳风暴,可以提前 15~60 min 预测地磁暴的发生,并能及时提醒电力部门引起注意,为电网空间灾害防御提供了保障^[13]。

收稿日期:2016-07-03;修回日期:2016-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577060);国家高技术

研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA121005)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577060) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA121005)

本文以电压偏移量和无功补偿设备投资最小为目标,将发电机组的无功出力、变压器变比以及补偿电容器作为无功优化的控制变量,提出一种基于小生境混沌变异的多目标粒子群优化 NCMOPSO (Niche Chaotic Mutation based Multi-Objective Particle Swarm Optimization) 算法的无功优化策略。GIC 标准算例的仿真结果表明了所提方法的实用性和有效性。

1 GMD 下无功优化建模

1.1 GIC 计算模型

根据法拉第电磁感应定律,GMD 期间地球表面形成了一个准直流的感应地电场 \mathbf{E} ,根据感应地电场的作用机制,线路感应电压值为感应地电场沿着该线路走向的积分值,即:

$$U_{dk} = \int \mathbf{E} d\mathbf{l} \quad (1)$$

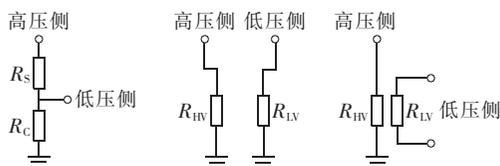
其中, U_{dk} 为线路感应电压值; $d\mathbf{l}$ 为线路长度积分微元; \mathbf{E} 为感应地电场矢量,与大地分层电导率、地磁场变化率等因素有关。

如果感应地电场恒定,则 U_{dk} 只与线路两端点的地理位置有关,即:

$$U_{dk} = \mathbf{E}\mathbf{l} = E_N L_N + E_E L_E \quad (2)$$

其中, E_N 、 E_E 分别为北向、东向的地电场值,单位为 V/km ; L_N 、 L_E 分别为输电线路两端点北向、东向的线路长度,单位为 km 。根据地磁感应电压 U_{dk} 和由输电线路、变压器绕组以及变电站接地网组成的直流网络,便可计算出 GIC 的值,详细计算过程可参考文献[14]。

在该直流网络中,变压器的直流模型相对复杂,需展开研究。针对 GIC 的计算网络,电力变压器一般包括自耦变压器和普通升降压变压器,其中升降压变压器的绕组形式又可分为 YN0-YN0 和 YN0-D 2 种,对应的变压器模型如图 1 所示。



(a) 自耦变压器 (b) 升降压变压器 (c) 升降压变压器 (YN0-YN0) (YN0-D)

图 1 变压器直流模型

Fig.1 DC models of transformers

图 1(a) 为自耦变压器模型,其中,高压侧与低压侧存在电联系的绕组称为串联绕组,其直流电阻值为 R_s ,与接地端相连的绕组称为公共绕组,其直流电阻值为 R_c ,2 个绕组均为 GIC 的流通过径。

GMD 期间,流经自耦变压器串联绕组和公共绕

组的 GIC 是不同的,根据磁动势平衡方程和全电流定律可得:

$$I_s N_s + I_c N_c = I_{eff} (N_s + N_c) \quad (3)$$

$$I_{eff} = \frac{(N-1)I_s + I_c}{N} \quad (4)$$

其中, N_s 为自耦变压器串联绕组匝数; N_c 为自耦变压器公共绕组匝数; I_{eff} 为等效 GIC; I_s 为流过串联绕组的 GIC; I_c 为流过公共绕组的 GIC; $N = U_H / U_L$, U_H 和 U_L 分别为高压侧和低压侧的端电压。

图 1(b) 为 YN0-YN0 升降压变压器模型,由于 GMD 期间,GIC 会在 2 个绕组中流通,同理可得流经变压器的等效 GIC 为:

$$I_{eff} = I_H + \frac{I_L}{N} \quad (5)$$

其中, I_H 、 I_L 分别为流经高压侧、低压侧绕组的 GIC。

图 1(c) 为 YN0-D 升降压变压器模型,在进行 GIC 计算时仅考虑高压侧存在流通过径,其原因是低压侧采用三角形连接方式,无 GIC 通路。因此,流经变压器绕组的等效 GIC 为流过变压器中性点 GIC 的 1/3。

1.2 GIC-Q 损耗模型

GIC 引起的变压器无功损耗与其流过绕组的 GIC 存在如式(6)所示的关系[7,15]。

$$Q_{GIC} = K U_{PU} I_{eff} \quad (6)$$

其中, K 为通过实验测试获得的 GIC-Q 损耗系数,单位为 $Mvar/A$,单相自耦变压器的 K 为 $1.8 Mvar/A$,单相组式变压器的 K 为 $1.18 Mvar/A$,三相壳式变压器的 K 为 $0.33 Mvar/A$,三相三柱芯式变压器的 K 为 $0.29 Mvar/A$,三相五柱式变压器的 K 为 $0.66 Mvar/A$; U_{PU} 为变压器端电压的标么值。

1.3 GIC-Q 优化模型

以 GIC-Q 损耗为研究对象,在电网结构和容量确定的条件下,充分利用现有机组的可调无功输出和有载调压变压器,同时在合适的节点配置无功补偿设备来应对 GIC-Q 损耗引起的电压波动,保证 GMD 期间电力系统的安全稳定运行。

(1) 目标函数。

以节点电压偏移和无功补偿设备成本最小为目标,建立了无功优化多目标函数,如式(7)所示。

$$\begin{cases} \min f = E(f_{VD}, f_Q) \\ f_{VD} = \sum_{i=1}^{N_{PQ}} \left| \frac{U_i - U_{i0}}{\Delta U_{max}} \right| \\ f_Q = \sum_{s=1}^{N_{RC}} C_s |Q_s| \end{cases} \quad (7)$$

其中, U_i 为 PQ 节点的实际电压; U_{i0} 为 PQ 节点的额定电压; ΔU_{max} 为节点电压的最大偏差; N_{PQ} 为 PQ 节点数; N_{RC} 为无功补偿容量可调节节点数; Q_s 为无功补偿容量; C_s 为设备单位容量投资; $E(\cdot)$ 为期望值。

(2)约束条件。

等式约束条件即概率潮流计算过程中的潮流方程为:

$$f(\mathbf{P}_G, \mathbf{Q}_G, \mathbf{P}_L, \mathbf{Q}_L, \mathbf{Q}_{RC}, \mathbf{Q}_{GIC}) = 0 \quad (8)$$

控制变量的不等式约束条件为:

$$\begin{cases} U_{Gi\min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi\max} & i=1, 2, \dots, N_G \\ T_{j,\min} \leq T_j \leq T_{j,\max} & j=1, 2, \dots, N_T \\ Q_{RCk\min} \leq Q_{RCk} \leq Q_{RCk\max} & k=1, 2, \dots, N_{RC} \end{cases} \quad (9)$$

状态变量的不等式约束条件为:

$$\begin{cases} U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{P}_G = [P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GN_G}]$, $\mathbf{Q}_G = [Q_{G1}, Q_{G2}, \dots, Q_{GN_G}]$ 分别为发电机节点的有功功率和无功功率向量, N_G 为发电机节点个数; $\mathbf{P}_L = [P_{L1}, P_{L2}, \dots, P_{LN_L}]$, $\mathbf{Q}_L = [Q_{L1}, Q_{L2}, \dots, Q_{LN_L}]$ 分别为负荷节点的有功功率和无功功率向量, N_L 为负荷节点个数; \mathbf{Q}_{GIC} 为 GIC 引起的变压器无功损耗; $\mathbf{Q}_{RC} = [Q_{RC1}, Q_{RC2}, \dots, Q_{RCN_{RC}}]$ 为并联电容器提供的无功功率向量; U_{Gi} 为发电机端电压; T_j 为变压器分接头; N_T 为变压器支路个数; 下标 max 和 min 分别表示上限值和下限值。

2 多目标优化算法

2.1 多目标优化问题

对于多目标优化问题,可以定义为:

$$\begin{cases} \min \mathbf{F}_i(\mathbf{X}) = [f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_M(\mathbf{X})] \\ \text{s.t.} & g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \text{ 或 } g_j(\mathbf{X}) \geq 0 \\ & h_k(\mathbf{X}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \mathbf{S}$, n 为决策个数, \mathbf{S} 为决策空间; M 为目标个数; $\mathbf{F}_i(\mathbf{X})$ 为目标函数; $g_j(\mathbf{X})$ 为不等式约束函数; $h_k(\mathbf{X})$ 为等式约束函数。

下面给出相关的几个定义。

定义 1 Pareto 支配: 存在 2 个可行解 x_1, x_2 , 称 x_1 支配 x_2 满足所有 $f_i(x_1) \leq f_i(x_2)$ 且至少有一个 $f_i(x_1) < f_i(x_2)$ 成立 ($i, j=1, 2, \dots, n$), 则记作 $x_1 \succ x_2$ 。

定义 2 Pareto 最优解: 一个解 $\mathbf{X}^* \in \Omega(\Omega)$ 为 M 维目标空间) 当且仅当式(12)成立时, \mathbf{X}^* 被称为 Pareto 最优解或非支配解。

$$\neg \exists \mathbf{X} \in \Omega: \mathbf{X} \succ \mathbf{X}^* \quad (12)$$

定义 3 Pareto 最优解集和前沿: 所有 Pareto 解的集合称为 Pareto 最优解集, 即:

$$P = \{\mathbf{X}^* | \neg \exists \mathbf{X} \in \Omega: \mathbf{X} \succ \mathbf{X}^*\} \quad (13)$$

所有 Pareto 最优解对应目标函数的值所形成的区域称为 Pareto 前沿或均衡面。

2.2 粒子群优化算法

粒子群优化(PSO)算法是由 Kennedy 博士等最

早提出的一种基于群体智能演化的计算方法。其基本原理就是通过迭代搜索最优解, 在每一次的迭代中, 粒子通过跟踪个体最优位置和全局最优位置来更新自己。则粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 个分量的速度和位置公式分别为:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (14)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (15)$$

其中, w 为惯性权重; c_1, c_2 分别为调节全局最优粒子飞行方向的加速常数和调节个体最优粒子飞行方向的加速常数; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 上的均匀随机数; p_{id} 为个体最优位置; p_{gd} 为全局最优位置; k 为迭代次数。

2.3 NCMMOPSO 算法

由于实际应用中需要对多目标问题进行优化, 所以多目标粒子群优化(MOPSO)算法得到了广泛的应用^[16-17], 本文结合 GIC-Q 损耗的特点, 提出一种 NCMMOPSO 算法。

2.3.1 小生境算法

小生境算法是根据粒子间距离形成每个粒子的小生境, 作为一个微粒群, 然后在每个微粒群体中利用 PSO 算法进行速度和位置更新。对于更新后的微粒群, 根据粒子间的距离, 利用共享机制提高粒子的适应度, 保证群体最优。

为了保存进化过程中已经找到的 Pareto 最优解, 建立了外部集存档技术, 并在迭代过程中对外部存档进行调整以提高计算效率。本文采用拥挤距离排序对外部集的粒子进行存档^[18]。

粒子间距离可表示为:

$$d_{ij} = \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_n} (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$ 为 D 维决策空间中的任意 2 个粒子; N_n 为小生境的个体数。对于给定的参数(小生境半径为 R_{ch}), 若 $R_{ch} > d_{ij}$, 则该个体加入小生境群体 \mathbf{X}_p 。

适应度可表示为:

$$f'_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{N_n} S(d_{ij})} \quad (17)$$

其中, f_i 为第 i 个个体的原始适应度; $S(d_{ij})$ 为共享函数, 如式(18)所示。

$$S(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - (d_{ij}/R_{ch})^\lambda & d_{ij} < R_{ch} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中, λ 为控制共享函数形状的参数。

2.3.2 混沌变异

过快的收敛速度会导致 MOPSO 算法搜索到局部最优 Pareto 最优前沿而非全局最优前沿, 为此, 本文将混沌变异引入到 MOPSO 算法中, 对当前粒子产生混沌扰动, 以返回最好的个体, 使解跳出局部极值区间。采用的混沌变异映射 Logistic 迭代公式为:

$$\beta_j^{k+1} = \mu \beta_j^k (1 - \beta_j^k) \quad (19)$$

其中, β_j^k 为第 k 次迭代中对应粒子 X_i 的第 j 个混沌变量, $\beta_j^k \in (0, 1)$; $\mu \in (2, 4)$ 。

2.3.3 算法步骤

NCMMOPSO 算法的具体步骤如下:

- 步骤 1 初始化, 包括算法的各个参数以及粒子群体, $k=1$;
- 步骤 2 计算目标函数, 将非支配解存入外部档案;
- 步骤 3 计算个体适应度值, 根据各粒子的位置确定小生境半径;
- 步骤 4 根据各粒子的位置和小生境半径确定小生境种群;
- 步骤 5 更新小生境群体的速度和适应度;
- 步骤 6 分别根据式(14)、(15)更新粒子的速度 v 和位置 x , 同时更新粒子的个体最优位置;
- 步骤 7 用当前粒子群的非支配解更新外部档案;
- 步骤 8 从外部档案中随机选择部分个体进行混沌变异, 搜索附近区域新的非支配解;
- 步骤 9 判断是否满足终止条件, 如果满足则结束, 否则 $k=k+1$, 转步骤 3 进行计算。

3 算例分析

本文采用 GIC 标准测试系统进行仿真计算, 其接线图如图 2 所示。

该系统包括 18 条母线、7 台发电机、1 个开关站、15 条线路、15 台变压器, 其中选择节点 1 为平衡

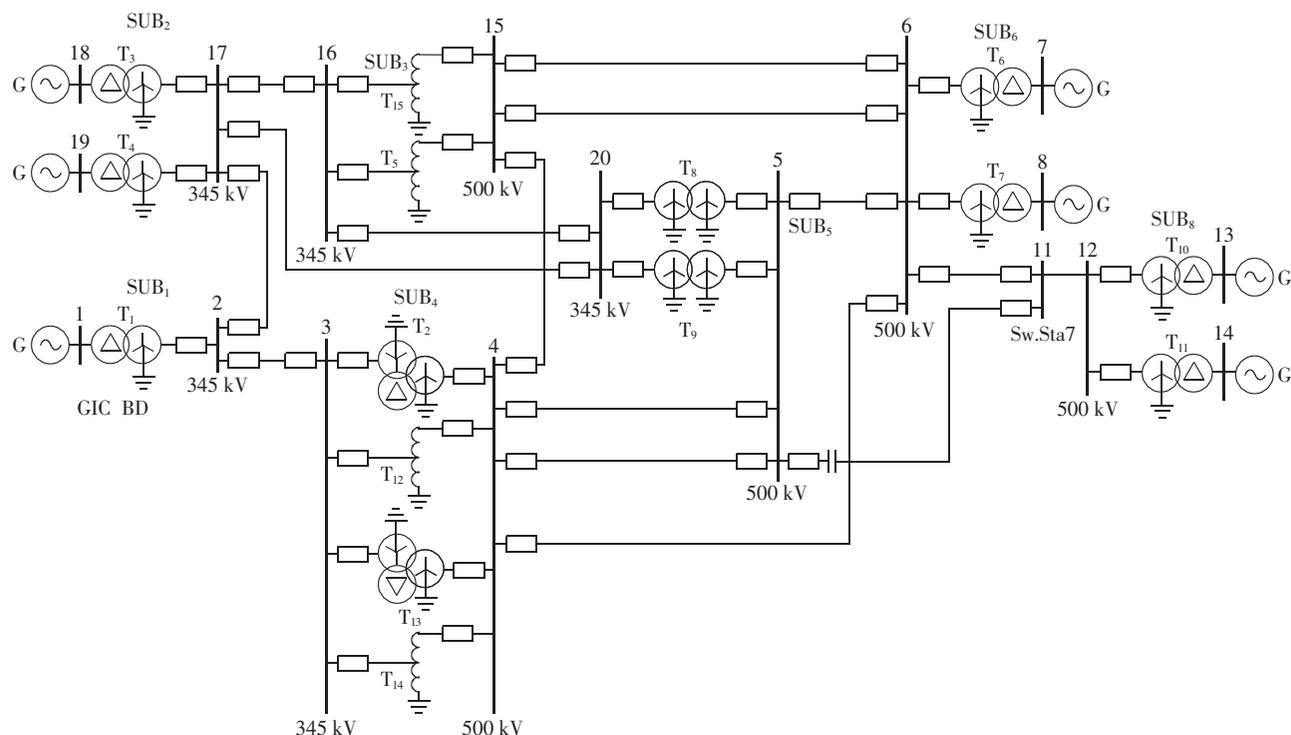


图 2 GIC 标准算例接线图

Fig.2 Wiring diagram of GIC-benchmark

节点, 节点 18、7 为 PV 节点, 其余发电机节点均为 PQ 节点, 负荷为 4700 MW+1800 Mvar, 其他参数详见文献[14, 19]。正常运行情况下, 电网不需配置电容器且所有节点电压均在额定范围之内, 潮流分布合理。

由于太阳活动引起的 GMD 决定中低纬电离层的电流体系, 目前, 国内外尚未探明太阳活动中低纬电离层电流体系的方向特征, 可认为中低纬 1 V/km 水平、任何方向的地电场都可能发生^[20]。

本文取 5° 为间隔均分 360°, 利用所建的模型研究 1 V/km 均匀恒定地电场作用下, 计算流经变压器绕组及输电线路的 GIC。图 3 给出了以 15° 为间隔的 24 个不同方向变压器 T₆ 高压绕组单相 GIC 的计算结果, 以东向方向为参考方向, 用线条的方向表

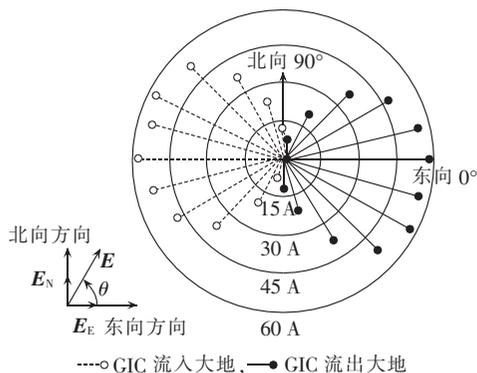


图 3 不同地电场方向下变压器 T₆ 高压绕组的单相 GIC 值
Fig.3 Single-phase GICs in high-voltage winding of transformer T₆ for different directions of geoelectric field

示地电场方向,用线条的长度表示 GIC 量值。

根据 GIC 计算的基本原理及图 3 的计算结果可知,GIC 在地电场方向 $\theta \in [0^\circ, 360^\circ]$ 范围内关于 180° 方向对称,即 GIC 值大小相等,极性相反,而 GIC-Q 损耗值仅与 GIC 的大小有关,与极性无关。为此,计算 GIC-Q 值仅考虑 $[0^\circ, 180^\circ]$ 范围内的地电场方向,计算结果如图 4 所示。

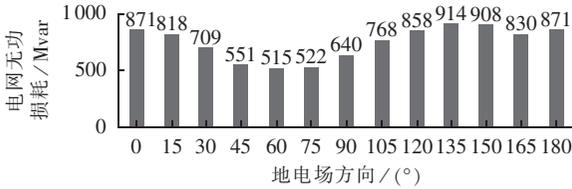


图 4 不同地电场方向下电网 GIC-Q 损耗值

Fig.4 GIC-Q losses for different directions of geoelectric field

通过计算可知,当地电场方向为 135° 时,电网 GIC-Q 损耗达到最大值 914 Mvar,此时各变压器的无功损耗如表 1 所示。

表 1 变压器 GIC-Q 损耗值

Table 1 GIC-Q loss of different transformers

变压器	无功损耗/Mvar	变压器	无功损耗/Mvar
T ₂	26.9	T ₉	58.5
T ₃	53.9	T ₁₀	13.0
T ₄	53.9	T ₁₁	13.0
T ₅	172.2	T ₁₂	59.7
T ₆	72.8	T ₁₃	26.9
T ₇	72.8	T ₁₄	59.7
T ₈	58.5	T ₁₅	172.2

从表 1 的数据可知,由于地磁暴的影响造成电网中变压器的无功损耗累计增加了 914 Mvar,如此大的无功损耗必然会导致电网电压下降。为此,在保证现有机组的最大无功输出和有载调压变压器最大调节范围下,选取在节点 4、15 和 20 上并联电容器组,进行合理的无功优化,使得各节点电压处于合理范围之内,从而保证电网的安全稳定运行。以节点电压偏移量和无功补偿设备成本最小为优化目标,通过 NCMMOPSO 算法求得上述多目标的 Pareto 最优解。

NCMMOPSO 算法的参数设置如下:惯性权重 $w=0.84$,加速因子 $c_1=c_2=1.545$,小生境存档规模为 70,种群粒子数为 50,最大迭代次数为 100。

为了说明本文优化算法的有效性,以最大迭代次数作为计算终止条件,比较 NCMMOPSO 算法、小生境 MOPSO(NMOPSO)算法和 MOPSO 算法这 3 种算法的收敛过程和收敛速度,具体如图 5 所示。

由图 5 可以看出,NCMMOPSO 算法在迭代前期的收敛速度明显快于 NMOPSO 算法和 MOPOS 算法,且搜索最优解的个数明显超过了 NMOPSO 算法

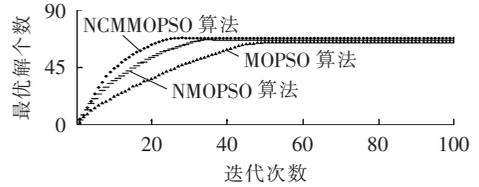


图 5 迭代收敛过程

Fig.5 Iterative convergence process

和 MOPOS 算法,在第 27 次迭代时 Pareto 最优解集的个体数已达到上限,实现算法收敛。而 NMOPSO 算法和 MOPSO 算法分别第 38 次和第 44 次迭代时才实现算法收敛。相比之下,本文所提算法的搜索能力和搜索速度要高于 NMOPSO 算法和 MOPSO 算法。

以电压偏移量(标幺值)和无功补偿设备成本最小为目标,利用 NCMMOPSO 算法求取 Pareto 前沿最优解集,如图 6 所示。

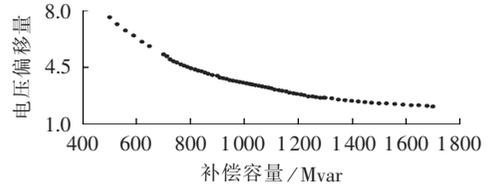


图 6 Pareto 最优解集分布

Fig.6 Distribution of Pareto optimal solution set

从图 6 可以看出,本文所提 NCMMOPSO 算法搜索到的最优解集形成了多个优化目标在不同情况下的最优解。通过计算可知,NCMMOPSO 算法的最优折衷解是:电压偏移量为 3.67 p.u.,无功补偿容量为 960 Mvar。优化所得的最优解为分别在节点 4、15、20 投入 210 Mvar、350 Mvar 和 400 Mvar 容量的电容器组;无功补偿优化后节点 20 的电压期望值为 0.948 p.u.,提高了 4.75%。图 7 为优化前后系统各节点电压值标幺值。

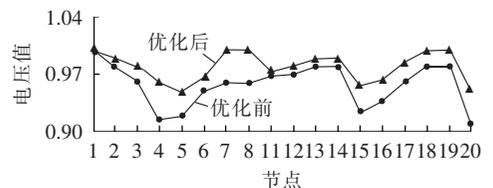


图 7 优化前后系统各节点电压值

Fig.7 Voltages of different buses, before and after optimization

通过图 7 可以看出,优化后节点电压均得到了改善,特别是节点 4、15 和 20 的电压明显提高了。

4 结论

a. 采用 1 V/km 的均匀地电场数据,计算了地电场方向以 5° 为间隔的 $[0^\circ, 180^\circ]$ 范围内 GIC 的

标准测试系统的电网无功损耗,计算结果表明,当地电场方向为 135° 时,GIC- Q 损耗达到最大值 914 Mvar。如此大的无功损耗必然会引起电网无功不足,为此,需在电网中合理配置无功补偿设备并进行优化。

b. 以节点电压偏移量和无功补偿设备成本最小为目标,建立了多目标无功优化的计算模型,并通过 NCMMOPSO 算法对无功优化模型进行求解。算例计算结果表明,所提方法收敛速度快,搜索到的最优解集更接近理想 Pareto 最优前沿,具有较好的优化性能,根据 NCMMOPSO 算法给出的最优折衷解进行无功优化配置,可使电网电压得到明显改善,保证了电网在 GMD 期间的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] TAKASU N, OSHI T, MIYAWAKI F, et al. An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2):1173-1183.
- [2] KAPPENMAN, ZANETTI, RADASKY. Geomagnetic storms can threaten electric power grid[J]. Earth in Space, American Geophysical Union, 1997, 9(7):9-11.
- [3] BARNES P R, DYKE J W V. Economic consequences of geomagnetic storms(a summary)[J]. IEEE Power Engineering Review, 1990, 10(11):3-4.
- [4] LESHNER R L, PORTER J W, BYERLY R T. Sunburst—a network of GIC monitoring systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1):128-137.
- [5] 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.
- [6] PIRJOLA R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 28(6):1867-1873.
- [7] DONG X Z, LIU Y L, KAPPENMAN J G. Comparative analysis of exciting current harmonics and reactive power consumption from GIC saturated transformers[C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, OH, USA: IEEE, 2001:318-322.
- [8] MARTI L, BERGE J, VARMA R K. Determination of geomagnetically induced current flow in a transformer from reactive power absorption[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3):1280-1288.
- [9] 刘连光, 秦晓培, 葛小宁, 等. 基于 $U-I$ 曲线的单相自耦变 GIC 无功损耗算法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12):55-60.
LIU Lianguang, QIN Xiaopei, GE Xiaoning, et al. GIC reactive power loss calculation based on $U-I$ curve for single-phase autotransformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12):55-60.
- [10] 刘林玉, 谢学武. 500 kV 主变压器异常声音分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(4):85-87.
LIU Linyu, XIE Xuewu. Analysis of increase of noise of 500 kV transform[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4):85-87.
- [11] LIU Lianguang. Influence and hazard of disastrous space weather on power grid in China[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(9):29-33.
- [12] KAPPENMAN J G, ALBERTSON V D, DAMSK B L, et al. Solar wind monitor satellite[J]. IEEE Power Engineering Review, 1990, 10(5):4-8.
- [13] KAPPENMAN J G, RADASKY W A, GILBERT J L. Advanced geomagnetic storm forecasting: a risk management tool for electric power operations [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 28(6):2114-2121.
- [14] HORTON R, BOTELER D H, OVERBYE T, et al. A test case for the calculation of geomagnetically induced currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):2368-2373.
- [15] REZAEI-ZARE A. Behavior of single-phase transformers under geomagnetically induced current conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2):916-925.
- [16] 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.
- [17] 刘仲, 牟龙华, 许旭锋. 微电网黑启动中考虑负荷恢复优化的分布式电源恢复方案[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3):46-52.
LIU Zhong, MU Longhua, XU Xufeng. Microgrid black-start considering DG startup sequence and load restoration optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):46-52.
- [18] 李中凯, 李艾民, 朱真才. 拥挤距离排序的多目标文化粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(9):1406-1410.
LI Zhongkai, LI Aimin, ZHU Zhencai. Cultural based multi-objective particle swarm optimization algorithm using crowding distance sorting method[J]. Control and Decision, 2012, 27(9):1406-1410.
- [19] 刘连光, 吴伟丽. 磁暴影响电力系统安全风险评估思路与理论框架[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10):1583-1591.
LIU Lianguang, WU Weili. Security risk assessment ideals and theoretical framework for power system considering geomagnetic storm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10):1583-1591.
- [20] 刘连光, 刘春明, 张冰, 等. 中国广东电网的几次强磁暴影响事件[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4):976-981.
LIU Lianguang, LIU Chunming, ZHANG Bing, et al. Strong magnetic storm's influence on China's Guangdong Power Grid [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4):976-981.

作者简介:



杨培宏

杨培宏(1980—),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,博士,主要研究方向为电网安全运行与灾变控制(E-mail:yph_1025@126.com);
刘连光(1954—),男,吉林汪清人,教授,博士,主要研究方向为电网安全运行与灾变控制、电力系统规划(E-mail:liulianguang@ncepu.edu.cn);

刘春明(1972—),男,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为电网磁暴灾害分析与控制(E-mail:cm_liu@163.com);
冯士伟(1992—),男,河南林州人,硕士研究生,主要研

究方向为电力系统分析与控制(E-mail:fengshiwei2015@163.com);

郑许朋(1990—),女,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:xp_zheng123@163.com)。

Multi-objective optimization strategy based on PSO algorithm for GIC-Q of power grid

YANG Peihong^{1,2}, LIU Lianguang¹, LIU Chunming¹, FENG Shiwei², ZHENG Xupeng²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: GIC(Geomagnetically Induced Current) may cause the DC magnetic bias when it flows through the transformer windings, resulting in the increase of transformer reactive-power loss, the imbalance of grid reactive-power and the impact on safe and stable grid operation. A multi-objective reactive-power optimization strategy based on the particle swarm optimization algorithm is proposed to restrain the influence of GIC and ensure the reactive-power balance of power grid under geomagnetic disturbance, which takes the minimum cost of reactive-power compensation equipments and the minimum voltage deviation as its objectives. The proposed strategy applies the niche sharing mechanism to update the particle locations and archives the Pareto optimal solution set according to the crowding distance for the diversity and uniformity of solutions. Chaotic mutation is introduced to avoid the locally optimal solutions and to improve the global searching ability. Simulative results of GIC-benchmark verify the accuracy and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: geomagnetic disturbance; geomagnetically induced current; reactive power optimization; voltage deviation; multi-objective optimization; niche; particle swarm optimization algorithm; chaotic mutation; Pareto optimality

(上接第 92 页 continued from page 92)

Harmonic resonance research based on modal analysis for grid-connected wind farms

TANG Zhendong, YANG Honggeng

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the harmonic resonance easily occurred during the grid-connection of wind farm, the modal analysis is applied to decouple the nodal admittance matrix of grid-connected system and the eigenvalue decomposition is adopted to determine the related information, such as resonant frequency, resonant centre, etc. The equivalent Norton model of grid-connected LCL inverter and the equivalent grid model are established, based on which, the resonance phenomenon of grid-connected wind farm is researched by the modal analysis and the resonant information of each node is determined, such as resonant participation factor, resonant center, etc. A simulation model based on PSCAD is built for an actual 99 MW wind farm and the variation laws of nodal resonant participation factor and resonant center versus the tieline length and the grid-connected generator quantity are studied, verifying the feasibility of the modal analysis applied.

Key words: wind farms; grid-connected inverter; harmonic resonance; modal analysis; participation factor