

基于混合模型的优化低频低压减载方法研究

陈 军¹, 陆 旭², 赵子涵¹, 向 博¹, 朱小红¹

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司内江供电公司, 四川 内江 641003)

摘要:文中以低频低压情况下保证电压稳定的前提下减载为研究内容,提出了一种基于混合模型的优化低频低压减载方法。该混合模型将遗传算法与人工神经网络相结合,在保证电压稳定的情况下选择合适的节点进行负荷切除。实验结果表明,该方法可以在低频低压情况下使负荷减载量达到最小。

关键词:低频低压;减载方法;混合模型

中图分类号:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)06-17-04

DOI:12.16527/j.issn.1003-6954.20210604

Research on Optimal Low-frequency and Low-voltage Load Shedding Method Based on Hybrid Model

Chen Jun¹, Lu Xu², Zhao Zihan¹, Xiang Bo¹, Zhu Xiaohong¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Neijiang Electric Power Supply Company, Neijiang 641003, Sichuan, China)

Abstract: Taking load shedding in low-frequency and low-voltage situations as the research content, an optimal low-frequency and low-voltage load shedding method based on hybrid model is proposed for load shedding under the condition of ensuring voltage stability. The hybrid model combines genetic algorithm with artificial neural network to select a suitable load bus for load shedding under the condition of ensuring voltage stability. The experimental results show that the proposed method can minimize load shedding in low-frequency and low-voltage situations.

Key words: low-frequency and low-voltage; load shedding method; hybrid model

0 引言

近年来,电力系统结构已经发生了巨大的改变,规模逐渐扩大,联系程度也日渐紧密^[1-3]。电网公司对常见的单一故障、较严重的故障、罕见的严重故障这三级标准制定了相应的解决措施,称之为保证规模安全稳定运行的三道防线^[4-5]。目前,电网公司对第一、第二道防线设备相关的在线监视、数据的信息化管控和数据的应用与分析已经逐渐趋于完善,然而对第三道防线设备数据的信息化管控能力有限^[6-8]。低频低压减载属于第三道防线的范畴内。

为了保证电网在受到巨大扰动后仍然能保证电力传输的稳定性,防止频率与电压崩溃事故的出

现^[9-10],下面在保证电压稳定的情况下对低频低压减载进行了研究,提出了一个集成遗传算法与人工神经网络的混合模型,在低频低压情况下进行最小化负荷切除。该方法根据潮流雅可比矩阵最小特征值灵敏度选择合适的节点进行负荷切除。

1 目标函数

建立以最小化减载量以及最大化电压稳定性为目标的目标函数^[11-12]。所提目标函数 F 由 F_1 和 F_2 的组合来表示,分别用于最小化减载量与电压不稳定性,如式(1)一式(4)所示。

$$\text{目标函数: } F = \min\{f(F_1, F_2)\} \quad (1)$$

$$F_1 = \min \left\{ \sum_i [P_{L_i} - f_i(x_{\min}) - f_i(x_{\max})] \right\} \quad (2)$$

$$F_2 = \min \left\{ \sum_i |1 - V_i| \right\} \quad (3)$$

$$f(F_1, F_2) = \gamma F_1 + (1 - \gamma) F_2 \quad (4)$$

式中: $f(F_1, F_2)$ 为待优化的组合目标函数; F_1, F_2 为目标函数; γ 为权重因子; P_{L_i} 为第 i 个节点的有功功率; V_i 为第 i 个节点的电压值; $f_i(x_{\min})$ 和 $f_i(x_{\max})$ 分别为第 i 个节点的最小限值和最大限值。同时, 为了减少电压崩溃, 使用式(3), 使电压变化的总幅度最小化。为了保证电压稳定的情况下实现最小化减载, 因此将权重因子 γ 设定为 0.5。

为了优化上述目标函数, 分别使用了等式和不等式约束, 如潮流方程、雅可比矩阵的特征值、发电机的有功功率和无功功率、负荷节点的有功功率和无功功率。这些约束由以下等式详细说明。

1) 功率约束用于计算当前运行条件下的功率, 以及确定负载条件和减载后的功率。各节点处的无功功率平衡潮流方程如式(5)一式(6)所示。

$$P_i = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$Q_i = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (6)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为第 i 个节点的有功功率和无功功率; $i = 1, 2, \dots, N_B, N_B$ 为节点数量; $j = 1, 2, \dots, N_{PQ}, N_{PQ}$ 为 PQ 节点的数量; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵第 (i, j) 个元素的实部和虚部。

2) 在不等式约束下, 考虑了发电机和负荷的有功功率和无功功率。因此, 优化问题的目标函数可以在更短的收敛时间内达到。不等式约束条件如式(7)一式(10)所示。

$$P_{G_n\text{-min}} \leq P_{G_n} \leq P_{G_n\text{-max}} \quad n = 1, 2, \dots, N_G \quad (7)$$

$$\Delta P_{G_n\text{-min}} \leq \Delta P_{G_n} \leq \Delta P_{G_n\text{-max}} \quad (8)$$

$$Q_{G_n\text{-min}} \leq Q_{G_n} \leq Q_{G_n\text{-max}} \quad n = 1, 2, \dots, N_G \quad (9)$$

$$\Delta Q_{G_n\text{-min}} \leq \Delta Q_{G_n} \leq \Delta Q_{G_n\text{-max}} \quad (10)$$

式中: N_G 为发电机数量; P_{G_n} 为第 n 个发电机发出的有功功率; ΔP_{G_n} 为第 n 个发电机的有功功率变化量; Q_{G_n} 为第 n 个发电机发出的无功功率; ΔQ_{G_n} 为第 n 个发电机的无功功率变化量。选择所有节点电压的幅值作为当前状态和减载条件下的不等式约束。

$$V_{i\text{-min}} \leq V_i \leq V_{i\text{-max}} \quad i = 1, 2, \dots, N_B \quad (11)$$

3) 在潮流雅可比矩阵中, 选择矩阵特征值的最小值作为当前运行点和减载条件下的不等式约束。

$$\lambda_{\text{initial_min}(i)} \geq \lambda_{\text{threshold_min}(i)} \quad (12)$$

$$\lambda_{\text{shed_min}(i)} \geq \lambda_{\text{threshold_min}(i)} \quad (13)$$

式中: $\lambda_{\text{initial_min}(i)}$ 为第 i 个节点在正常工作点的初始最小特征值; $\lambda_{\text{threshold_min}(i)}$ 为第 i 个节点的最小特征值阈值; $\lambda_{\text{shed_min}(i)}$ 为第 i 个节点在减载点的最小特征值。

因为最小减载量取决于系统视在功率特征值的灵敏度, 所以根据潮流雅可比矩阵最小特征值对减载的灵敏度选择合适的减载节点。第 i 个节点最小特征值的变化 $\Delta \lambda_{\min}$ (即特征值灵敏度) 由特征值变化的斜率值和负荷功率的变化计算得出。

$$\Delta \lambda_{\min} = x_i \Delta P_i + y_i \Delta Q_i \quad (14)$$

式中: x_i 为相对于特征值和有功功率的斜率特性变化; y_i 为相对于特征值和无功功率的斜率特性变化。

$$x_i = \frac{\Delta \lambda_{\min, P}}{\Delta P_i} \quad (15)$$

$$y_i = \frac{\Delta \lambda_{\min, Q}}{\Delta Q_i} \quad (16)$$

式中: $\Delta \lambda_{\min, P}$ 与 $\Delta \lambda_{\min, Q}$ 分别为有功功率和无功功率变化量对应的特征值变化量; ΔP_i 与 ΔQ_i 分别为第 i 个节点的有功功率和无功功率变化量。从式(14)中可以计算出特征值的变化, 特征值的变化表明可以根据发电量的变化来确定最佳减载节点并给出减载量。

2 混合模型

采用遗传算法和人工神经网络相结合的方法进行减载计算。遗传算法分为两个阶段: 1) 构建优化模型; 2) 生成减载模型的数据集。遗传算法的第一阶段由式(1)在约束条件下表示。在第二阶段, 使用遗传算法生成数据集, 并用该数据集训练神经网络模型, 进而提高减载模型的性能。根据神经网络模型, 对于给定输入特征值进行减载预测。

2.1 遗传算法

遗传算法用于最小化负载有功功率变化和电压变化^[13]。为了最大限度地减少负荷切除以及电压变化, 遗传算法被应用于两个阶段。在第一阶段, 计算雅可比矩阵的最小特征值, 得出进行最小负荷切除的目标节点; 然后, 通过使用遗传算法的第二阶段来减少电压偏差, 从而选择负荷切除的数量; 最后, 从这两个阶段遗传算法的结果中, 产生最佳的训练数据集。

遗传算法由种群初始化、适应度评估、交叉、变异和终止 5 个步骤组成^[14]。

1) 初始化优化族群。最小特征向量是按照特征值的范围随机初始化, 特征值的范围从雅可比矩

阵的初始特征值中选择。

$$\lambda_{\min} = [\lambda_{\min(1)}, \lambda_{\min(2)}, \dots, \lambda_{\min(i)}] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

式中, $\lambda_{\min(i)}$ 为第 i 个节点的最小特征值。

2) 计算初始节点的适应度函数。在遗传算法的第一阶段, 使用式(2)计算适应度函数; 第二阶段使用式(3)计算适应度函数。

$$\lambda_{\text{fit_min}} = [\lambda_{\text{fit_min}(1)}, \lambda_{\text{fit_min}(2)}, \dots, \lambda_{\text{fit_min}(i)}] \quad (18)$$

$$P_{\text{fit_shed}} = [P_{\text{fit_shed}(1)}, P_{\text{fit_shed}(2)}, \dots, P_{\text{fit_shed}(i)}] \quad (19)$$

式中: $\lambda_{\text{fit_min}(i)}$ 为第 i 个节点最小特征值的适应值; $P_{\text{fit_shed}(i)}$ 为第 i 个节点负载功率的适应值。

3) 在染色体的适应值和生成的新染色体之间进行交叉操作。在生成新的染色体之后, 对新的染色体应用适应函数。

4) 在突变中, 根据给定的突变率对基因进行随机突变。

5) 在终止阶段, 根据适应度函数选择最优方案。优化过程的最优值表示为 $\lambda_{\text{best_min}(i)}$ 和 $P_{\text{best_shed}(i)}$, 分别为第 i 个节点的最优特征值与第 i 个节点的最优减载量。然后, 将最优拟合值输入于神经网络, 以训练减载模型。

2.2 人工神经网络

传统减载预测中, 人工神经网络的训练数据集由实际系统生成, 这里采用遗传算法生成的数据作为训练数据训练神经网络。神经网络的输入为 $\lambda_{\text{best_min}(i)}$, 输出为 $P_{\text{best_shed}(i)}$ 。神经网络由输入层、隐含层、输出层组成^[15]。网络输入训练数据以及输出训练数据表示为:

$$\lambda_{\text{best_min}} = [\lambda_{\text{best_min}(1)}, \lambda_{\text{best_min}(2)}, \dots, \lambda_{\text{best_min}(i)}] \quad (20)$$

$$P_{\text{best_shed}} = [P_{\text{best_shed}(1)}, P_{\text{best_shed}(2)}, \dots, P_{\text{best_shed}(i)}] \quad (21)$$

神经网络中的反向传播训练步骤如下:

1) 为每一个神经元初始化输入、输出以及权重。

2) 确定输出误差 E 。

$$E = P_{\text{best_shed}} - P_{N_shed} \quad (22)$$

式中: $P_{\text{best_shed}}$ 为目标输出; P_{N_shed} 为实际输出。

3) 网络输出计算。

$$P_{N_shed} = \varphi + \sum_{n=1}^N w_{2n1} P_{N_shed}(n) \quad (23)$$

$$P_{N_shed}(n) = \frac{1}{1 + \exp(-w_{1n} \lambda_{\text{best_min}})} \quad (24)$$

式中, w_i 为神经元权重。式(23)一式(24)分别为输出层与隐含层的激活函数。

4) 根据式(24)改变神经元权重。

$$w_{\text{new}} = w_{\text{old}} + \Delta w \quad (25)$$

$$\Delta w = x \cdot P_{N_shed} \cdot E \quad (26)$$

式中, x 为学习率, 变化范围为 0.25 ~ 0.5。

5) 重复步骤 2 至步骤 4, 直到输出误差为最小值。

$$E < 0.1 \quad (27)$$

当训练完成后, 神经网络将可以根据任意最小特征值确定减载量 P_{N_shed} 。

3 仿真验证

将提出的混合模型减载方法在 MATLAB 工作平台上实现。这里采用低频低压情况下的 14 节点系统对所提出的混合方法的性能进行测试, 评估负载最小特征值、节点电压和负载有功功率。

该 14 节点系统由 1 号和 2 号节点上的两台发电机以及 3 号、6 号和 8 号节点上的冷凝器组成。节点电压的理想范围为 0.95 ~ 1.06 pu。此系统中引发减载的原因是发电短缺。

首先, 根据雅可比矩阵计算负荷节点的特征值, 并根据计算出的特征值及实际功率范围确定这些节点的特征值范围。然后, 计算节点的灵敏度, 并根据特征值的最大灵敏度选择减载节点。

通过使用柱状图分析了混合算法的性能, 并与基本情况和遗传算法的结果进行了比较。图 1—图 3 分别展示了节点的最小特征值、电压幅值和负载功率在使用不同方法下的变化情况。

从图 1 可以看出, 3 号、4 号和 14 号节点的特征值灵敏度最大, 根据这些特征值的灵敏度, 可以解决减载问题。如图 3 所示, 在 3 号节点上, 遗传算法计

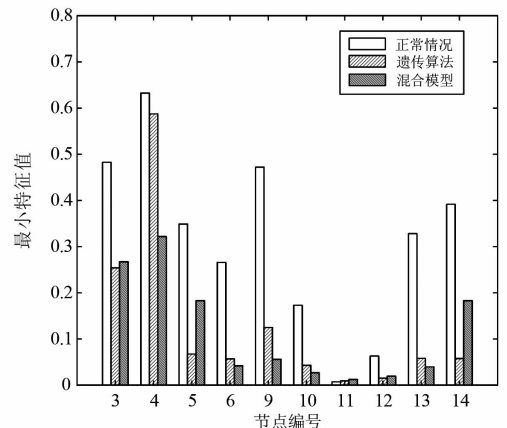


图 1 最小特征值比较

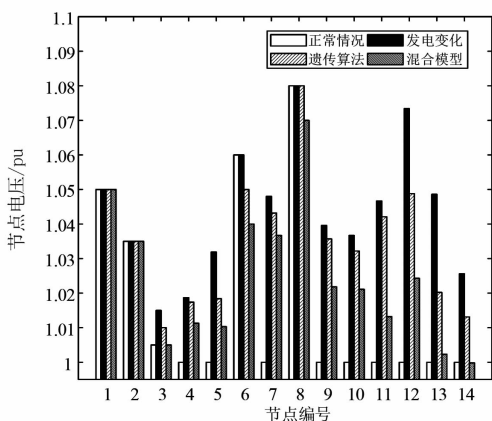


图 2 节点电压大小比较

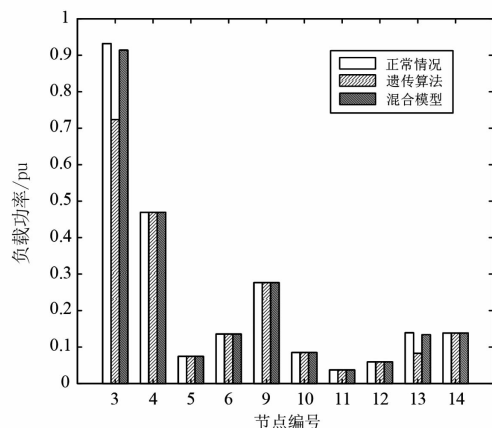


图 3 节点功率变化比较

算的减载量多于混合模型计算的减载量。比较结果表明,与基本情况相比,使用混合方法进行减载可以达到最小化减载的效果。所有结果表明,所提出的混合方法可以实现最小化减载。

4 结 论

上面提出了一种结合遗传算法与人工神经网络的混合模型,用于在低频低压、保证电压稳定的情况下实现最小化减载的方法。在该混合模型中,遗传算法分两个阶段使用,即构建优化模型和生成用于训练网络的数据集。根据潮流雅可比矩阵最小特征值的灵敏度,选择合适的减载节点。该算法计算简单,适用于非线性问题。将该混合模型在低频低压情况下的 14 节点系统上进行了测试,并对其有效性进行了验证。结果表明,该方法可以在低频低压情况下实现最小化减载与最小化电压波动。

参考文献

[1] 薛禹胜,任先成, Q. H. Wu, 等. 关于低频低压切负

荷决策优化协调的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9):100-107.

- [2] 任先成,薛禹胜, Q. H. Wu, 等. 低频低压切负荷布点及轮次的优化与协调[J]. 电力系统自动化,2009, 33(11):1-7.
- [3] 张建明,刘俊勇. 电力系统建设项目进度 3D 可视化关键技术[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):118-121.
- [4] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术,2012,36(8):1-5.
- [5] 王超,李继红,陆春良,等. 浙江电网第二、三道防线现状及完善建议[J]. 浙江电力,2012,31(8):13-16.
- [6] 邓华. 电力系统稳定控制第三道防线的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [7] 张丹. 计及风电影响的电网第三道防线优化配置策略研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [8] 许琴. 第三道防线适应性分析[J]. 机电信息, 2017(33): 133-134.
- [9] 韩金铜. 低频低压减载及其协调方法的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2009.
- [10] 孙镜轩,张昊,高浩,等. 孤网运行期间变电站站内低频低压减载装置不正确动作分析[J]. 科技创新与应用, 2020(16):58-59.
- [11] 李晔,张保会. 基于暂态电压稳定性新指标的自适应紧急减载方案[J]. 智能电网,2016,4(1):7-12.
- [12] 苑画舫. 北京电网低压减载方案研究[D]. 保定:华北电力大学,2008.
- [13] 王超,安俊俊,郝元钊. 基于免疫遗传算法的电压优化调整与治理研究[J]. 电测与仪表,2015,52(5): 109-113.
- [14] 吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2):69-73.
- [15] 李萍,曾令可,税安泽,等. 基于 MATLAB 的 BP 神经网络预测系统的设计[J]. 计算机应用与软件,2008, 25(4):149-150.

作者简介:

陈 军(1971),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

陆 旭(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

赵子涵(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

向 博(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

朱小红(1967),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化。

(收稿日期:2021-10-12)