

基于改进孪生神经网络的低频低压 减载装置在线解耦控制方法

于立强^{1†}, 刘佳言¹, 李露¹, 霍晓燕¹, 李世杰²

(1. 国网冀北承德供电公司, 河北 承德 067000; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘要: 低频低压减载装置的过度应用导致装置系统出现负荷大的问题, 降低了低频低压减载装置的实用性。为此, 提出了基于改进孪生神经网络的低频低压减载装置在线解耦控制方法。该方法通过分析低频低压减载装置频率特性, 为低频低压减载装置在线解耦控制提供了重要信息基础; 在此基础上构建低频低压减载装置混合模型, 从该模型中生成可训练的数据集, 并依据潮流雅可比矩阵的减载特征最小值灵敏度, 确定低频低压减载装置系统减载量; 为提升系统的控制精度, 将获取结果输入至改进孪生神经网络中, 训练出最佳减载量, 并将其分配到装置系统减载节点中, 达到切除负荷的目的, 实现低频低压减载装置在线解耦控制。通过对该方法开展减载效率对比测试、控制性能对比测试, 实验结果验证了该方法具有较强的实用性。

关键词: 改进孪生神经网络; 低频低压减载装置; 在线解耦控制; 潮流雅可比矩阵

中图分类号: TM76

文献标识码: A

On Line Decoupling Control Method of Low Frequency and Low Voltage Load Shedding Device Based on Improved Siamese Neural Network

YU Liqiang^{1†}, LIU Jiayan¹, LI Lu¹, HUO Xiaoyan¹, LI Shijie²

(1. State Grid Jibei Chengde Electric Co., Ltd., Chengde, Hebei 067000, China;

2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The excessive application of low frequency and low voltage load shedding devices leads to the problem of large load in the device system, which reduces the practicability of low frequency and low voltage load shedding devices. In order to solve this problem, an online decoupling control method of low frequency and low voltage load shedding devices based on improved twin neural network is proposed. By analyzing the frequency characteristics of low frequency and low voltage load shedding devices, this method provides important information for online decoupling control of low frequency and low voltage load shedding devices; On this basis, a hybrid model of low frequency and low voltage load shedding device is constructed, from which a trainable data set is generated, and the load shedding amount of low frequency and low voltage load shedding device system is determined according to the minimum sensitivity of load shedding characteristics of power flow Jacobian matrix; In order to improve the control accuracy of the system, the obtained results are input to the improved twin neural network, the optimal load shedding amount is trained, and distributed to the load shedding node of the device system, so as to achieve the purpose of cutting off the load, and realize the online decoupling control of low-frequency and low-voltage load shedding devices. The experimental results show that the method has strong practicability through the comparative test of load shedding efficiency and control performance.

收稿日期: 2023-02-24

作者简介: 于立强(1979-), 男, 河北承德人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电力系统继电保护技术。

†通信联系人, E-mail: bajiao8036859@163.com

Key words: improved Siamese neural network; low frequency and low voltage load shedding device; on line decoupling control; power flow Jacobian matrix

由于当前所需电力供应日益提升,因而在多需求引领下现代电力系统大部分采用大机组容量、超高压线路,且电力网络的输送范围较大,具有较强的供电可靠性及经济性。在高电量供应下,我国城市对电力系统的依赖性增强,电力系统在多重压力下出现频率及电压均崩溃的问题,在给国家带来威胁的同时还影响着人类的生命安全。为保证电力系统的供电质量及安全稳定性,我国开始采用低频低压减载设备^[1-2],以预防出现电压崩溃事故。近几年来,随着我国电力技术的发展,低频低压减载装置应用广泛,但过度使用也会出现设备负荷大的问题,为提升低频低压减载装置的实用性,需要对该装置实施在线解耦控制研究。

林莉等人提出基于节点电动机最大自启动量的配电网低压减载方法^[3],该方法优先获取低频低压减载装置出现电压崩溃的主要原因,制定减载计算方法和策略,获取减载装置在不同转速下的减载量,通过对获取结果的判定依据,进一步建立减载策略,在减载装置中进行有效的切负荷处理,保证设备可以平稳运行,实现了低频低压减载装置控制。该方法的获取结果不完善,存在控制效率低的问题。

王怀远等人提出基于估测惯量计算的低频减载方法^[4],该方法对低频低压减载装置内部功率缺额实施有效分析,针对这一不足提出量化算法,以此获取扰动后的低频低压减载装置负荷相应信息,通过计算系统功率缺额,设计出最佳切负荷方案,从而实现低频低压减载装置控制。该方法获取的信息结果有误差,存在低频低压减载装置恢复效果不佳的问题。

李世春等人提出大规模双馈风电机参与调频的电网自适应低频减载策略方法^[5],该方法根据减载装置的有效研究,计算出首轮在低频减载时的实际功率缺额,依据系统频率、负载的定量表征,将其用作实际功率缺额的抵消,以此制定出合理的减载策略切除负荷,实现低压减载装置的控制。该方法的计算结果有缺陷,存在电压恢复效果差的问题。

为此,提出了基于改进孪生神经网络的低频低压减载装置在线解耦控制方法。

1 低频低压减载装置特性分析

1.1 低频低压减载装置频率静态特性分析

低频低压减载装置发生频率变化后,用户会随着频率的变化而消耗一定功率。由于低频低压减载装置负荷对频率变化产生影响,所以根据低频低压减载装置的负荷功率及频率关系分析低频低压减载装置的负荷静态频率特性。

低频低压减载装置频率降低后,耗失的功率会对装置系统的静态负荷频率产生影响,所以可通过下式分析负荷静态频率特性^[6-7]:

$$P_{fhf} = K_0 P_{fhe} + K_1 P_{fhe} (f/f_e) + \dots + K_n P_{fhe} (f/f_e)^n \quad (1)$$

式中, P_{fhf} 表示消耗后的负荷功率; P_{fhe} 表示负荷功率; K_0, K_1, \dots, K_n 均定义为比例系数; f 标定频率; f_e 标定额定频率; n 标定系数。

低频低压减载装置频率与额定值之间的偏离度较小时,可利用直线对不同频率下的装置负荷功率变化近似表示,即:

$$P_{fhf} = P_{fhe} + Y P_{fhe} (f - f_e / f_e) \quad (2)$$

式中, Y 标定负荷调节效应系数; f_{he} 标定额定值。

根据方程(2)可知,当 Y 表示频率变化 1% 时,说明用户消耗的功率对 Y 发生改变,且 Y 的取值均通过不同类型的负荷比重决定,所以不同的低频低压减载装置 Y 的取值不同。可进一步利用百分值表示负荷功率:

$$\Delta P_{fhf} (\%) = 2Y \Delta f \quad (3)$$

式中, Δf 标定数值表示下的频率。

低频低压减载装置频率稳定性与负荷调节效应密切相关,低频低压减载装置未发生事故前,设置装置总负荷由 P_{fh1} 定义,总发电功率由 P_{g1} 定义,当两者与 f_e 平衡后,可满足 $P_{g1} = P_{fh1}$; 若装置出现功率缺额事故,装置的有效功率下降至 P_{g2} , 装置也会因此发生有功缺额,定义: $\Delta P = P_{g2} - P_{g1}$ 。式中, ΔP 标定有功缺额。

1.2 低频低压减载装置频率动态特性分析

当低频低压减载装置出现功率缺额时,装置系统频率下降就是整个装置的低频动态频率特性。

分析低频低压减载装置频率动态特性时,可将装置看成可转换的整体,由于装置系统内含有任一机械转动点 j ,那么该装置的机械角速度动态特性就由下式表述:

$$J_j \frac{\omega_j}{t} = T_{gj} - T_{fhj} \quad (4)$$

式中, J_j 记作转动惯量; ω_j 记作角速度;驱动机械的转矩记作 T_{gj} ;制动机械转矩记作 T_{fhj} ; t 为时间。

假设在低频低压减载装置中包含 n 个机械转动点:

$$\sum_{j=1}^n J_j + \omega_{ej}^2 \frac{\omega_j}{t} = P_{gj} - P_{fhj} \quad (5)$$

式中, P_{gj} 记作机械功率; P_{fhj} 记作电气功率; ω_{ej}^2 记作额定角速度。

视低频低压减载装置为机械能、电能转换整体后,利用下式获取机械角速度动态方程表达式:

$$J_x \omega_e^2 \frac{\omega_j}{t} = P_g - P_{fh} \quad (6)$$

式中, $J_x \omega_e^2$ 标定机械转动惯量。

当低频低压减载装置的惯性时间为 T_x 时,将其与系统的转矩差相加,使驱动力矩为额定值,装置从静止状态加速到角速度后所耗时间就由下式计算获取:

$$T_x = \frac{\omega_e}{\alpha} = \frac{J_x + \omega_e^2}{P_{ge}} \quad (7)$$

式中, α 标定转角加速度; P_{ge} 标定总发电功率。

装置系统负荷处于额定状态下,系统右端功率基值就是装置系统的总功率。当系统出现事故后,装置系统会自动减少负荷,而发电机组在系统内会自动调到最大值,这时发电机组的进汽量、进水量都属于定值,即 $\Delta P_{g^*} = 0$ 。表达式中, ΔP_{g^*} 为 P_{ge} 的基值。

将该表达式代入到方程(2)后求解,得出:

$$\Delta f = \Delta f_{\infty} e^{\frac{-t}{T_f}} \quad (8)$$

式中, Δf_{∞} 记作差值; T_f 记作时间常数。

T_f 表示为: $T_f = (P_{ge}/P_{fhe})(T_x/Y)$ 。

从方程(8)可知,低频低压减载装置的频率动态特性是一条指数曲线,且装置的机械惯性就是时间常数的 $1/Y$,代表全装置的平均频率变化。

2 低频低压减载装置在线解耦控制

2.1 基于潮流雅可比矩阵的低频低压减载量获取

根据分析的低频低压减载装置频率特性,构建

低频低压减载装置混合模型,以此生成用于训练网络的数据集,再基于潮流雅可比矩阵的减载特征最小值灵敏度,确定减载数据。

构建目标函数,表示如下:

$$\begin{cases} A = \min \{a[A_1, A_2]\} \\ A_1 = \min \left\{ \sum_i [P_{Li} - a_i(x_{\min}) - a_i(x_{\max})] \right\} \\ A_2 = \min (1 - V_i), a(A_1, A_2) = \kappa A_1 + A_2 \end{cases} \quad (9)$$

该目标函数由 A_1 、 A_2 两组目标函数构成,其中, $a(A_1, A_2)$ 定义为待优化的目标函数; κ 定义为权重因子; P_{Li} 定义为有功功率; V_i 定义为电压值; i 定义为节点; $a_i(x_{\min})$ 定义为最小限值; $a_i(x_{\max})$ 定义为最大限值。上述构建的目标函数即为建立的混合模型,同时为避免减载装置出现电压崩溃现象,所以需要装置电压总幅度变化最小化,确保在一定程度下实现最小化减载。

采用等式和不等式约束优化目标函数。

利用功率约束低频低压减载装置在当前运行下的功率,进一步计算减载装置负载条件及减载后的功率^[8],其计算结果由潮流方程定义:

$$\begin{cases} P_i = V_i + V_j (H_{ij} \cos \theta_{ij} + O_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i + V_j (H_{ij} \sin \theta_{ij} + O_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, P_i 为有功功率; Q_i 为无功功率; H_{ij} 为矩阵元素的实部; O_{ij} 为矩阵元素的虚部; (i, j) 为元素; θ_{ij} 为负载。

考虑低频低压减载装置在不等式约束条件下的功率,建立不等式约束条件:

$$\begin{cases} \Delta P_{Hn-\min} \leq \Delta P_{Hn} \leq \Delta P_{Hn-\max} \\ \Delta Q_{Hn-\min} \leq \Delta Q_{Hn} \leq \Delta Q_{Hn-\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, ΔP_{Hn} 定义为第 n 个装置有功功率变化量; ΔQ_{Hn} 定义为无功功率变化量。

进一步选取减载装置全部节点电压幅值,将其作为不等式约束: $V_{i-\min} \leq V_i \leq V_{i-\max}$ 。

利用潮流雅可比矩阵的最小特征值表述装置系统在减载条件下的不等式约束,定义:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{initial_min}(i)} \geq \lambda_{\text{threshold_min}(i)} \\ \lambda_{\text{shed_min}(i)} \geq \lambda_{\text{threshold_min}(i)} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\lambda_{\text{initial_min}(i)}$ 为初始最小特征值; $\lambda_{\text{threshold_min}(i)}$ 为阈值; $\lambda_{\text{shed_min}(i)}$ 为减载点的最小特征。

减载装置的最小减载量取决于功率特征灵敏度,基于潮流雅可比矩阵特征值,获取装置系统的合适减载节点。因而通过下式计算特征值的斜率值及负荷功率变化:

$$\Delta\lambda_{\min} = x_i \Delta P_i + c_i \Delta Q_i \quad (13)$$

式中, $\Delta\lambda_{\min}$ 记作特征值灵敏度; x_i 记作斜率值变化, 与有功功率有关; c_i 记作斜率特性变化, 与无功功率有关。

根据方程(13)可获取低频低压减载装置的特征值变化, 有利于确定低频低压减载装置的发电量变化, 以此确定减载量。

2.2 在线解耦控制

将计算的低频低压减载装置减载量输入到改进孪生神经网络中实施分类训练, 以此分类出最佳类标签, 即最佳减载量, 并将其分配到合适的减载节点中, 有效实现低频低压减载装置的负荷减载, 完成低频低压减载装置在线解耦控制。

构建改进孪生神经网络结构^[9-10], 如图1所示。

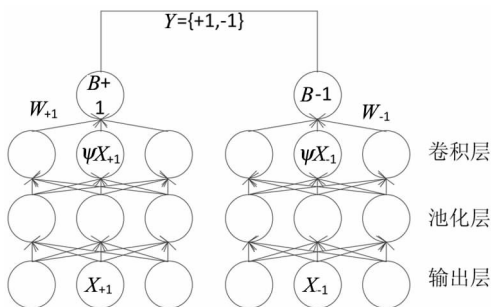


图1 孪生神经网络结构图

改进孪生神经网络主要由三层结构组成, 设置低频低压减载装置减载量为输入向量, 记作 s , 利用卷积层转化 s , 记作 $\varphi(s)$, 所以 s 经池化处理到输出层, 经输出层的分配器训练数据。

孪生神经网络由两个神经网络组成, 为此孪生神经网络的误差函数由 E_{+1} 、 E_{-1} 表示, 如下所示:

$$E_{+1} = (y_i - o_i)^2 + (\omega_{+1}^T \varphi_{+1}(s^i) + b_{+1})^2 \quad (14)$$

$$E_{-1} = (y_i - o_i)^2 + (\omega_{-1}^T \varphi_{-1}(s^i) + b_{-1})^2 \quad (15)$$

式中, $y_i \in \{-1, +1\}$ 表示样本类标签, 当 $y_i = -1$ 时, 说明与 B 类样本相对应; 当 $y_i = +1$ 时, 说明与 A 类样本相对应; o_i 表示输出值, 且 $o_i = f(\text{net}_i)$, $f(\text{net}_i)$ 记作激活函数; $\omega_{+1}^T \varphi_{+1}(s^i) + b_{+1}$ 记作分类器超平面; E_{+1} 为第一个误差函数输出值; $\varphi_{+1}(s^i)$ 为倒数第二层输出向量; E_{-1} 为第二个误差函数输出值; b 表示偏差。

方程(14)、方程(15)的组合是孪生机制的基本思想, 为此利用误差计算出权重、偏差的偏导数, 定义如下:

$$E_{+1}/\omega_{+1} = \alpha \omega_{+1} (y_i - o_i)^2 + (\omega_{+1}^T \varphi_{+1}(s^i) + b_{+1})^2 \quad (16)$$

式中, α 标定常数; ω_{+1} 标定权重。

根据计算结果, 将低频低压减载装置减载量输入到改进孪生神经网络中实施训练, 其控制流程如下所示^[11-12]:

(1) 将减载量作为训练样本的 s 类标签;

(2) 输入到神经网络后通过隐含层将 s 类标签映射到空间 $\varphi(\cdot)$ 中;

(3) 映射完成后输入到输出层, 并利用下式判断出 s 的类标签 y , 表示如下:

$$y = \begin{cases} +1, & \frac{\omega_{+1}^T \varphi(s) + b_{+1}}{\|\omega_{+1}\|} \leq \frac{\omega_{-1}^T \varphi(s) + b_{-1}}{\|\omega_{-1}\|} \\ -1, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

(4) 根据计算结果输出判断的最佳减载量。

依据训练结果, 分类出低频低压减载装置的最佳减载量, 将其分配到低频低压减载装置的合适减载节点中, 在保证电压稳定的情况下切除负荷, 实现低频低压减载装置在线解耦控制。

3 实验与分析

为了验证基于改进孪生神经网络的低频低压减载装置在线解耦控制方法的整体有效性, 需要对该方法开展实验对比测试。

采用基于改进孪生神经网络的低频低压减载装置在线解耦控制方法(方法1)、基于节点电动机最大自起动量的配电网低压减载方法(方法2)和基于估测惯量计算的低频减载方法(方法3)实施测试。

本次实验选取低频低压减载装置中的 EPRI-36 节电系统作为研究对象, 如图2所示。

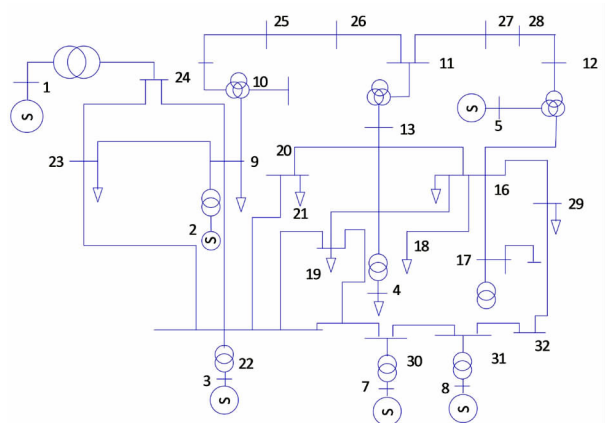


图2 低频低压减载装置节点系统结构图

在该系统内选取多个负荷节点用作切负荷节点, 同时节点1属于系统平衡节点。制定等比例减载方案, 分别对低频低压减载装置实施减载, 该方案制定结果如下。

方案 1:负荷节点 22,分配减载量 0.78 pu,减载百分比 20%;

方案 2:负荷节点 20,分配减载量 0.95 pu,减载百分比 20%;

方案 3:负荷节点 19,分配减载量 0.52 pu,减载百分比 20%;

方案 4:负荷节点 17,分配减载量 1.15 pu,减载百分比 20%。

(1)根据制定的减载方案,分别采用方法 1、方法 2、方法 3 对低频低压减载装置实施在线解耦控制,依据三种方法切负荷消耗的时间,判定三种方法的控制效率,测试结果如表 1 所示。

表 1 三种方法的减载效率对比测试

减载方案	低频低压减载装置减载时间		
	方法 1	方法 2	方法 3
方案 1	21.278	35.915	26.548
方案 2	19.345	28.512	37.841
方案 3	26.315	30.345	42.395
方案 4	25.954	39.518	39.851

分析表 1 中的数据发现,根据设定的四种方案,方法 1 所消耗的低频低压减载装置减载时间要少于方法 2 和方法 3,而方法 2 和方法 3 在切负荷时所用时间较长,可证明这两种方法的减载效率较低。

(2)设定低频低压减载装置内出现大扰动,系统发生扰动后会出现电压紊乱的问题,为此采用方法 1、方法 2 和方法 3 对扰动下的低频低压减载装置实施在线解耦控制恢复测试,其控制结果如图 3 所示。

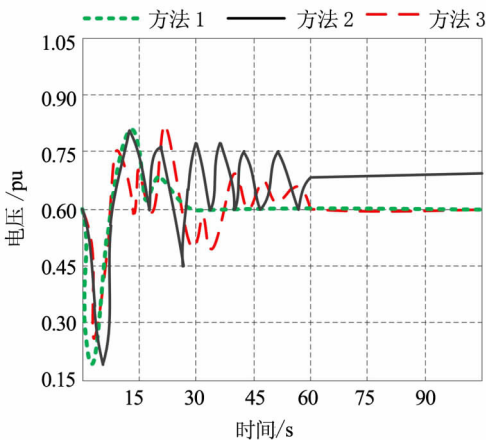


图 3 低频低压减载装置电压恢复曲线

根据图 3 中的数据,发现系统扰动后电压会出现大幅度下降现象,采用方法 1 实施减载控制后,可以经过短暂的振荡后重新回归到正常的电压状态,保持电压稳定性。而方法 2 和方法 3 需要较长

时间才可以恢复到正常状态,说明方法 2 和方法 3 的控制性能要低于方法 1。

(3)选取一个三机 10 节点的低频低压减载装置系统,从该系统中分别出现三相短路,且短路时间维持在 0.3s,导致系统节点出现功角失稳的现象,同时低频低压减载装置也出现电压、频率不稳定的问题,详情如图 4 所示。

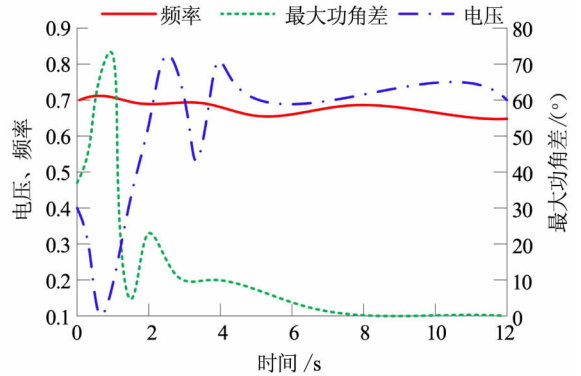


图 4 三相短路下的低频低压减载装置系统

从图 4 可见,在三相短路下低频低压减载装置系统存在频率、最大功角差、电压波动起伏不平稳的问题,针对这一问题,采用本文所提方法对低频低压减载装置开展协调控制,根据控制后的低频低压减载装置系统状态,判定本文所提方法的整体控制效果,其测试结果如图 5 所示。

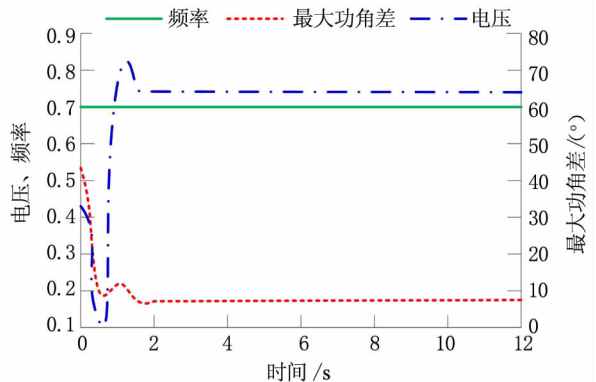


图 5 低频低压减载装置控制后的系统状态

分析图 5 发现,采用本文所提方法对三相短路下的系统实施协调控制后,系统内的电压、频率、最大功角差可以在最短时间内恢复平稳,可见所提方法的整体控制效果极佳。这是因为本文所提方法优先分析了低频低压减载装置的动静态频率特性,以此为低频低压减载装置在线解耦控制提供了重要信息,大大地提升了低频低压减载装置在线解耦控制性能。