

机器学习下配电网短路故障快速智能恢复方法研究

任庭昊

(贵州电网有限责任公司遵义供电局, 贵州 遵义 563000)

摘要: 由于配电网短路故障产生的运维成本逐年增加, 影响电力企业整体经济效益, 为此提出机器学习下配电网短路故障快速智能恢复方法。分析回声状态网络, 建立配电网短路故障恢复模型; 设置配电网运行指标约束条件, 构建回声状态网络目标函数, 计算函数中个体与约束条件间的违背程度, 得到实际目标函数; 在目标优化阶段, 保证重要负荷最大化, 再考虑配电网运行均衡度, 以此实现配电网短路故障快速智能恢复。对所提方法展开实验测试, 结果表明, 所提方法可有效恢复故障支路和节点, 同时恢复后电压、电流波动均保证在所允许的范围。

关键词: 机器学习; 配电网短路故障; 智能恢复; 目标函数; 目标优化

中图分类号: TP181 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0045-05

Research on Fast Intelligent Restoration Method of Power Grid Short Circuit Fault Based on Machine Learning

REN Ting-hao

(Zunyi Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Zunyi 563000 China)

Abstract: As the operation and maintenance cost of distribution network short-circuit fault increases year by year, which affects the overall economic benefits of power enterprises, a fast intelligent recovery method of distribution network short-circuit fault based on machine learning is proposed. The echo state network is analyzed, and the short-circuit fault recovery model of distribution network is established. The distribution network operation index constraint conditions are set, the echo state network objective function is constructed, and the violation degree between the individual and the constraint conditions in the function is calculated to obtain the actual objective function. In the target optimization stage, the important load is maximized, and then the operation balance of the distribution network is considered, so as to realize the quick and intelligent recovery of the short-circuit fault of the distribution network. The experimental results of the proposed method show that the proposed method can effectively restore the fault branches and nodes, and the voltage and current fluctuations are guaranteed within the allowable range after restoration.

Keywords: machine learning; short circuit fault of power grid; Smart Recovery; objective function; target optimization

0 引言

电网是连接发电端与用户端的重要桥梁, 为了实现用户的最大权益以及电力企业的最大经济效益, 需要对电网的稳定性、经济性以及安全性进行实时监控^[1]。电网在设计时, 一般都是采用闭环的方式, 由独立的分段开关和联络开关组成^[2]。在实际操作中, 通过关闭分段开关和开启联络开关, 可以实现网络的辐射分布。通过改变两个开关的位置, 可以改变电网的运行结构, 从而影响电网的线损、电压质量和负荷平衡指标, 这种方式称之为电网网络重构^[3]。因此, 合理分配开关位置, 使电网运行达到最佳状态, 是网络重构要完成的目标, 也是短路故障快速恢复的根本途径之一。

电网短路故障恢复无需投入其他成本费用, 只需要

对网络结构进行优化, 将电网自身潜力发挥到最大, 即可利用较低的成本实现短路故障的智能恢复, 这无论对于国家还是电力系统来说, 都将会产生非常大的经济效益。从根本上来说, 电网短路故障快速智能恢复是一类非线性、多目标和多约束的综合优化问题。电网规模在不断扩大过程中, 极易对优化过程造成“维数灾”现象, 使得优化效率逐渐降低。不仅如此, 国内外相关专家在处理该问题时, 常常以加权的形式转换多目标优化问题为单目标, 这将导致优化结果单一、无法取得全局最优解。

基于此, 本文利用回声状态网络(Echo State Network, ESN)对电网结构进行非监督学习。这种学习方式即使不训练样本, 也可使电网具有良好的自动学习能力。首先, 对ESN的网络结构和相关参数进行分析, 保证谱半径为最佳状态; 然后, 根据目标函数和约束条件, 构建电网短路故障快速智能恢复模型, 对4个目标函数、2个电网运行

*基金项目: 贵州电网有限责任公司科技创新项目(060300KK52170009)

收稿日期: 2023-09-22

指标以及3个约束条件展开分析;其次,对函数中个体违背约束条件的程度展开计算,得到违背和未违背约束条件时的ESN实际目标函数;最后,在优化过程中,要先满足重要负荷最大化,再满足网损小的条件,以此实现电网短路故障的智能恢复。实验中搭建了16个节点的电网结构,对本文方法展开测试,结果表明,本文方法可在保障非故障区域正常供电的前提下,实现故障区域的智能恢复,与此同时,各条支路、各个节点的电流、电压波动均在所允许的范围内。

1 机器学习的回声状态网络

1.1 回声状态网络结构

回声状态网络作为机器学习算法的一种,主要由三层结构组成,分别是:输入层 $U(t)$ 、储存池 $X(t)$ 和输出层 $Y(t)$,三者之间的关系如图1所示。

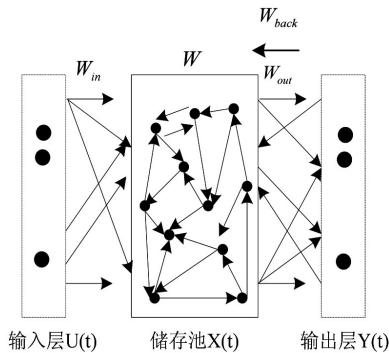


图1 回声状态网络结构图

在图1中,储存池内各个神经元之间均有着直接或间接的联系,储存池的作用相当于一个记忆库^[4-5]。在回声状态网络的初始阶段,随机生成连接度为2%~6%的神经元连接权值 W 。在记忆库的初始阶段,随机生成 W_{in} 和 W_{back} ,分别表示 $U(t)$ 内神经元与 $X(t)$ 内神经元、 $Y(t)$ 内神经元与 $X(t)$ 内神经元之间的连接权值。

在 t 时刻下, $U(t)$ 、 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 的具体表达公式如式(1)所示:

$$\begin{aligned} U(t) &= [u(1) \ u(2) \ u(3) \ \cdots \ u(t-1) \ u(t)]^T \\ X(t) &= [x(1) \ x(2) \ x(3) \ \cdots \ x(t-1) \ x(t)]^T \\ Y(t) &= [y(1) \ y(2) \ y(3) \ \cdots \ y(t-1) \ y(t)]^T \end{aligned} \quad (1)$$

式中, T 表示时间系数。

在 $t+1$ 时刻下,对存储池和输出层单元进行更新,得到:

$$\begin{aligned} X(t+1) &= l(WX(t) + W_{in}U(t) + W_{back}Y(t)) \\ Y(t+1) &= l_{out}(W_{out}X(t+1) + W_{bias}^{out}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, W_{out} 表示 $Y(t)$ 与 $X(t)$ 之间的连接权值, W_{bias}^{out} 代表的是偏置单元^[6], l_{out} 、 l 分别表示 $Y(t)$ 内和 $X(t)$ 内的激活函数。

由式(1)、式(2)可以看出,ESN 会随着输入内容的增加不断增加储存池的层次,逐渐形成一个复杂的网络结

构。由于 W_{back} 的存在,ESN 可保留上一时刻的各项数据,从而使结构更具完整性。

1.2 ESN 相关参数

对于ESN的相关参数,本文仅分析 W_{in} 、 W_{out} 、 W 、 W_{back} 。对于这4个参数, W_{in} 、 W 、 W_{back} 是随着回声状态网络初始化而形成的,值是固定不变的,后续不会发生任何改变,只有 W_{out} 会随着训练过程而发生变化。

通常情况下,存储池的回声特性对ESN的性能至关重要,它直接关系到ESN能否正常工作。回波状态特征是指上一个时间点的输入状态对当前时间状态的作用。随着时间的推移,这种影响将被逐渐淹没,这也是ESN在短时记忆方面的重要作用^[7]。这种短时记忆能力能够使得网络动态性能得到改善,但如果记忆能力过强,将会导致ESN的学习能力衰弱。在电网短路故障快速智能恢复应用中,为了获取最佳回声状态特性,通常会使 W 的谱半径满足 $S_R < 1$, S_R 越趋近1,短期记忆能力就会越强;当 $S_R = 0$ 时,ESN 进入到静态模式识别状态。 S_R 的计算过程为:

$$S_R = \frac{1}{|\lambda_{max} W_0|} \times \alpha \times W_1 \quad (3)$$

式中, W_0 表示稀疏矩阵, W_1 表示理想状态下的谱半径矩阵, λ_{max} 表示 W_0 的最值, α 表示本文给出的谱半径矩阵。

2 回声状态网络下电网短路故障快速智能恢复实现

2.1 建立电网短路故障快速智能恢复模型

在回声状态网络中,通过建立目标函数和约束条件,完成电网短路故障快速智能恢复模型的构建。

2.1.1 目标函数

(1) 选取电网中的重要负荷 f_1 进行优化恢复,恢复公式为:

$$\min f_1(p) = \sum_{i \in C} (1 - k_i) L_i \quad (4)$$

式中, p 表示目标函数系数, k_i 表示节点 i 的状态信息, C 表示 f_1 的集合, L_i 表示节点 i 的负荷信息,1表示电网带电,与之相对应的为0,表示电网失电。

(2) f 对于电网中的失电负荷 f_2 ,要做到尽可能多地恢复,恢复公式为:

$$\min f_2(p) = \sum_{i \in M} (1 - k_i) L_i \quad (5)$$

式中, M 表示未发生失电故障区域节点构成的集合。

(3) 在短路故障恢复过程中,要尽可能保证电网具有较高的运行均衡度 E :

$$\min E(p) = \sum_{j \in \Omega} \left(H_j - \frac{\sum_{k \in \Omega} H_k}{n} \right)^2 \quad (6)$$

式中, H_i 、 H_k 二者均表示电网输电线路负载率, n 表示电网中输电线路总数, Ω 表示电网节点构成的集合, j 、 k 均表示电网中的节点。

(4) 在电网发生故障时,要尽可能保证低的网络损耗 f_4 :

$$\min f_4(p) = \sum_{i \in N} I_i^2 R_i \quad (7)$$

式中, I_i 、 R_i 分别表示节点 i 上的电流和电阻, N 表示电网支路集合。

2.1.2 确定相关指标

在计算得到电网输电线路负载率后,计算电网的运行均衡度 E ,并将其作为电网安全运行指标^[8]。

电网输电线路负载率函数表达式为:

$$H_i = \frac{S_{Li}}{S_{LN,i}} \quad (8)$$

式中, S_{Li} 、 $S_{LN,i}$ 分别表示节点 i 的实际功率以及容量。

电网运行均衡度 E 计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(H_i - \frac{\sum_{k=1}^n H_k}{n} \right)^2 \quad (9)$$

E 的值是衡量电网运行线路潮流是否均衡的重要指标之一,具有全局性特点^[9]。在相同的负荷状态下, E 的值越小,各线路的潮流越均衡,电网运行的安全水平也就越高;反之,则潮流出现不均衡现象,电网运行安全水平也就越低^[10]。

2.1.3 约束条件

上文提到的目标函数需在以下几个约束条件下实现:

(1) 对于没有分布式电源的电网而言,要满足式(10)所示的辐射运行网络约束条件:

$$g_k \in G_k \quad (10)$$

式中, g_k 表示当前电网网络结构, G_k 表示电网中满足辐射状运行的线路集合。

(2) 电网线路容量约束为:

$$S_i \leq S_{LN,i} \quad (11)$$

式中, S_i 表示节点 i 的视在功率。

(3) 电网节点电压约束为:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (12)$$

式中, U_i 表示节点 i 的电压幅值, $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别表示 U_i 的极大值和极小值。

2.2 优化目标与约束条件处理

电网故障恢复模型中的约束条件很难通过具体的公式描述,为此,本文选择惩罚函数来处理约束条件。

将ESN的目标函数表示为:

$$A = [a_1, a_2, a_3] \quad (13)$$

式(13)中个体违背约束条件的重要度计算公式为:

$$P = [p_1, p_2, p_3] \quad (14)$$

式中, P 表示惩罚函数。

ESN的实际目标函数表达式为:

$$G = [g_1, g_2, g_3] \quad (15)$$

当目标函数中不存在违背约束条件的个体时, $P=0$, ESN的实际目标函数如式(16)所示。

$$G = A \quad (16)$$

当目标函数中存在违背约束条件的个体时, ESN的实际目标函数将转换为:

$$G = [a_{1\max} + \varepsilon p_1 + \beta p_2 + \mu p_3, a_{2\max} \varepsilon p_1 + \beta p_2 + \mu p_3, a_{3\max} \varepsilon p_1 + \beta p_2 + \mu p_3 = A_{\max} + RP] \quad (17)$$

式中, A_{\max} 表示ESN目标函数中的极大值, $R=[\varepsilon, \beta, \mu]$ 表示惩罚因子矩阵^[11], ε, β, μ 均为惩罚因子,代表了与之对应的惩罚函数在式(17)中所占的比例。

在目标优化过程中,要尽可能地增加 f_1 的值和缩小 f_4 的值,使二者始终处于相互矛盾中。在实际的电网中, f_1 较 f_4 来说有着更高的优先级^[12],通常都是先满足重要负荷最大化、再满足网损小的条件。那么,降低 f_4 值的目标函数表达式为:

$$q = \varepsilon f_1 + f_4 \quad (18)$$

由于 f_4 值具有非常大的数量级,这就要求惩罚因子 ε 的值要足够大,这样才能使优化目标尽可能地满足重要负荷最大化的要求,至此完成电网短路故障快速智能恢复。

3 实验测试

为了验证本文方法在实际应用中是否同样合理有效,实验中模拟了一个16节点电网结构,具体如图2所示。

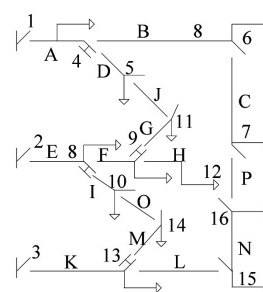


图2 16节点电网结构图

图2中,1~16表示实验电网中的节点, A~P代表了电网支路信息,其中, J、O、P是与联络开关相对应的支路。电网支路参数详细信息如表1所示。

在表1中, \mathcal{R} 、 D 分别表示电网支路中存在的电阻和电抗, F 、 B 分别表示电网的有功功率和无功功率。

电网节点1、2、3的三相功率基准值为100 MVA、电压为28 kV。除了发生短路故障的节点之外,其余所有节点电压波动都要保证在200 V之内。支路A、K、E

所允许通过的最大电流为1 000 A,支路B、C、P、N、L、F为800 A,支路H为600 A,支路D、J、G、I、O、M为400 A。

表1 电网支路参数信息

初始节点	末端节点	支路		末端节点		末端节点 并联电容
		g	D	F	B	
1	4	0.07	0.10	2.0	1.6	—
4	5	0.08	0.11	3.0	1.5	1.1
4	6	0.09	0.18	2.0	0.8	1.2
6	7	0.04	0.04	1.5	1.2	—
2	8	0.11	0.11	4.0	2.7	—
8	9	0.08	0.11	5.0	3.0	1.2
8	10	0.11	0.11	1.0	0.9	—
9	11	0.11	0.11	0.6	0.1	0.6
9	12	0.08	0.11	4.5	2.0	3.7
3	13	0.11	0.11	1.0	0.9	—
13	14	0.09	0.12	1.0	0.7	1.8
13	15	0.08	0.11	1.0	0.9	—
15	16	0.08	0.04	2.1	1.0	1.8
5	11	0.04	0.04	—	—	—
10	14	0.04	0.04	—	—	—
7	16	0.09	0.12	—	—	—

实验中,从电网支路中随机选取一条作为故障支路,并生成相应的故障数据。将ESN的神经元连接权值W稀疏度设定为0.01,谱半径设定为0.65,储存池中包含1 000个单元。对故障支路进行学习,然后输出最优解为:

- (1) 故障支路A:做了3次开关动作,重要负荷恢复量为1 089 kVA,电网运行均衡度E为2.71,线损为297.16 kW;
- (2) 故障支路B:做了3次开关动作,重要负荷恢复量为1 089 kVA,电网运行均衡度E为2.73,线损为232.23 kW;
- (3) 故障支路E:做了3次开关动作,重要负荷恢复量为1 089 kVA,电网运行均衡度E为2.74,线损为411.03 kW;
- (4) 故障支路D:做了5次开关动作,重要负荷恢复量为1 089 kVA,电网运行均衡度E为2.74,线损为233.58 kW;
- (5) 故障支路M:做了5次开关动作,重要负荷恢复量为1 089 kVA,电网运行均衡度E为2.76,线损为237.79 kW;
- (6) 故障支路F:做了3次开关动作,重要负荷恢复量为1 089 kVA,电网运行均衡度E为2.75,线损为201.66 kW。

通过上述分析可以看出,经过ESN的学习后,可使非故障停电区域恢复正常供电,所有故障支路恢复至正常状态下。同时,本文方法满足了优先恢复重要负荷的要求。

当支路K发生故障时,开关7、16闭合,开关3断开,所产生的线损为224.51 kW。在这种情况下,节点13、14、15、16将处于失电状态下,对开关3做断开处理,将4个失电节点与电网分离开。开关7、16作为联络开关,当处于闭合状态时,可将4个故障节点上的负载经由电网支路转移到正常节点上,由正常节点继续完成供电,从而实现故障区域的正常供电。经过上述操作处理,电网中16

个节点的电压波动变化情况如图3所示,故障恢复后的支路电网如图4所示。

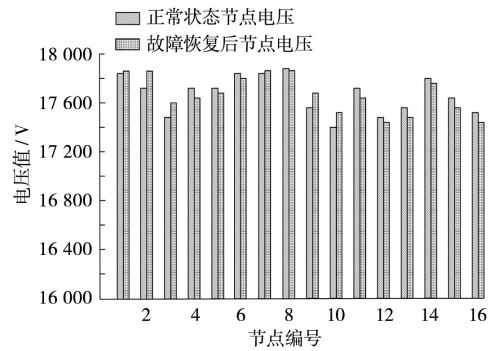


图3 16个节点电压波动情况

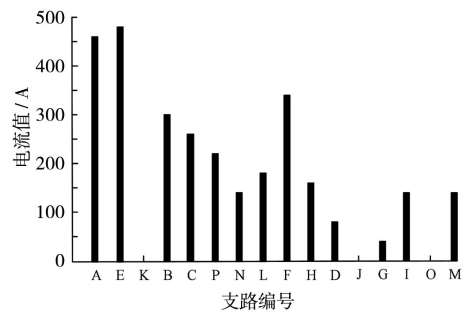


图4 故障恢复后支路电流变化情况

通过观察图3和图4可以看出,16个节点的电压波动均小于200 V,处于所允许范围内,各条支路电流也未超过最大电流限制。因此,可以得出结论,本文提出的电网短路故障恢复方法满足了各个约束条件的限制,以重要负荷最大化为首要考虑条件,其次再考虑线损,实现短路故障线路的快速智能恢复。

4 结束语

本文利用回声状态网络,对电网进行自学习,激发电网最大潜能,以此实现短路故障快速智能恢复。与传统方法相比,本文方法节约了成本费用、缩短了故障恢复时间。通过展开相关实验测试,结果表明,本文方法可在保证非故障停电区域的正常供电后,恢复所有故障线路,同时将电压、电流波动值稳定在所允许的范围内。

参考文献:

- [1] 郑翔,王慧芳,姜宽,等.机理与数据融合驱动的含IIDG配电网短路电流计算方法[J].电力自动化设备,2021,41(1):41-47.
- [2] 冯悻彬,张雪松,汪湘晋,等.基于主动探测的直流微电网故障区段辨识与快速恢复策略[J].电力自动化设备,2021,41(5):183-188.
- [3] 李振坤,何苗,苏向敬,等.基于生物体免疫机制的智能配电网故障恢复方法[J].中国电机工程学报,2021,41(23):7924-7937.
- [4] 刘坤,赵丽萍,李建萍,等.考虑开关状态集调整的含光伏并网配电网动态故障恢复方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):

(下转第75页)