

[数据挖掘]

智能配电网多级无功联动协调优化方法

文/陈杰
福州万山电力咨询有限公司

为减少电压越限损失量，实现对智能配电网的多级无功联动协调，设计基于调压资源数据挖掘模型的智能配电网多级无功联动协调优化方法。根据调压资源占比量求解结果，构建数据挖掘模型，联合相关电信号量差值，计算无功功率补偿向量的取值范围，完成对智能配电网无功功率极限的分析。

数据挖掘就是通过既定算法在大量数据样本中搜索隐藏信息的处理过程，可以在分析数据特征的同时，确定信息参量之间的映射关系，包含数据准备、规律探索和规律表示三个基本执行步骤^[1-2]。与其他类型的信息搜索方法相比，数据挖掘所面对的数据样本可以是结构化、半结构化，甚至是异构化的，故而该方法在处理信息参量时的自由化等级更高，不对数据源参量之间的互联关系进行严格要求。但在一些特定环境中，数据挖掘算法的应用则要求数据样本参量在集合空间中不得存在相互覆盖的排列形式。

配电网是指从区域发电厂或局域输电网接收电能，并通过下级配电设施按照电压下降原则将这些电量信号分配给其他用户的电力应用网络。大多数配电网都采用闭环连接模式，下级设备呈现辐射状排列状态，当同一电力区域内存在多个不同等级的用户对象时，配电网对于电量信号的分配遵循由高到低的原则。然而，由于电力系统中存在许多负载变化和电力设备运行状态的不确定性，导致无功补偿的控制难度较大。因此，在实际应用中，需要对无功补偿进行联动协调优化，以提高其控制效果和经济性。无功联动协调优化方法已成为无功补偿控制的重要研究方向之一。该方法旨在通过优化各个

无功补偿设备之间的协调关系，降低无功损耗和电压波动，提高电网的供电质量和能源利用效率。因此，研究无功联动协调优化方法对于电力系统的安全稳定运行和节能降耗具有重要意义。如卢姬等^[3]在第一阶段优化有载调压变压器，并联电容器等离散控制装置，提出了主动配电网的两阶段无功机会约束优化方法，基于混合整数二阶锥，通过场景缩减法，主动减少机会约束优化方法的场景数。李军等^[4]基于区块链技术，依靠少量的测量数据与信息交互，结合二阶锥规划凸松弛方法对优化模型进行分散化处理，利用交叉方向乘子法，生成鲁棒优化调节策略，完成现有的电力交易，需求响应等功能。

压变信号越限传输时，电压损失量较大，这不但会导致配电网的无功联动功率水平下降，还会使电网运行稳定性受到影响。主动优化调节、鲁棒优化调节策略虽然能够确定电压越限行为的发生区域，但却因不能有效控制无功功率的波动情况，无法有效降低电压越限传输过程中的损失量水平。针对上述问题，引入调压资源数据挖掘模型，并以此为基础，设计一种新型智能配电网多级无功联动协调优化方法。

智能配电网无功功率极限

1. 数据挖掘模型

调压资源占比量是指电压越限传输过程中,可调度电压信号在电压输出信号中的占比数值,该项指标参量的求解数值越大,表示可调度电压信号在电压输出信号中占比量越大,当前情况下,无功功率的表现行为较为明显,智能配电网主机对于传输信号的协调能力相对较强。在智能配电网环境中,利用数据挖掘模型可以在统计调压资源占比量的同时,确定电压信息输入样本与输出样本之间的对应关系,能够为无功功率参量的求解提供数据信息参考条件^[5]。所谓数据挖掘模型就是指包含完整联动协调规则的信息样本调度结构,求解配电网多级无功功率指标时,该模型负责整合其他信息反馈参量,并可以在挖掘中心组织中对这些信息样本进行整合,整个处理过程中,已输入信息与输出信息之间的对应关系不会发生变化,但为增强信息样本的传输速率。完整的数据挖掘模型连接结构如图1所示。

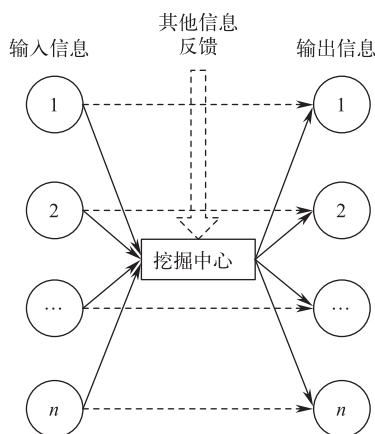


图1 数据挖掘模型定义形式

当数据参量转存量达到预设存储标准后,配电网主机停止信息输入行为,直至将这些数据样本全部传输至下级应用组织之中。为避免多级无功功率指标在联动协调的过程中出现与智能配电网运行状态不匹配的情况,在设置数据挖掘模型时,要求同一对应关系之下,输入节点转存的信息样本存储格式与输出节点转录的信息样本存储格式保持一致,且单一节点处无功功率指标的最大存储数值不得超过智能配电网主机对数据样本的最大存储条件。

2. 无功功率补偿向量

无功功率补偿向量是指智能配电网环境中,无功功率指标的单位做功数值,在电压越限传输层级组织较多的情况下,无功功率补偿向量的求解数值越大,表示无功功率指标的做功能力越强,即当前情况下,实现无功功率的联动协调处理,所需消耗的传输电压相对较多。补偿系数是求解无功功率补偿向量的关键物理参量,计算公式为

$$P = \frac{1}{\gamma} O \left[\phi \left| \frac{\dot{S}_1 \cdot \dot{S}_2 \cdots \dot{S}_n}{(n-1) A_{\max}} \right|^2 \right] \quad (1)$$

式中, γ 为越限电压的传输方向系数; $\dot{S}_1, \dot{S}_2, \dots, \dot{S}_n$ 为 n 个随机选取的电压补偿指征,且 $\dot{S}_1 \neq \dot{S}_2 \neq \dots \neq \dot{S}_n$ 的不等式取值条件恒成立; ϕ 为智能配电网环境中的电压极化系数; $A_{\max}$ 为单位时间内无功功率指标的最大做功数值。

在式(1)基础上,设 Δg 为越限电压的单位损耗量; f 为无功功率指标的联动协调系数; φ, ι 为智能配电网环境中两个不为零的调压参数,且 $\varphi \neq \iota$ 的不等式条件恒成立; G_φ 为基于参数 φ 的电压资源挖掘特征值; G_ι 为基于参数 ι 的电压资源挖掘特征值。联立上述物理量,可将无功功率补偿向量求解表达式定义为

$$D = \left(\frac{P}{f \times |\Delta g|} \right) / \sqrt{G_\varphi^2 + G_\iota^2} \quad (2)$$

利用调压资源数据挖掘模型实施智能配电网多级无功联动协调,要求参数 G_φ 、参数 G_ι 不能同时取值极大值或极小值。

多级无功联动协调优化方法

在调压资源数据挖掘模型的基础上,利用协调灵敏度指标、联动越限电压数值,求解无功发生器响应特性条件,完成智能配电网多级无功联动协调优化方法的设计与应用。

1. 协调灵敏度

对于智能配电网多级无功的联动协调,涉及对无功功率指标协调灵敏度的求解。在调压资源数据挖掘模型的认知中,随着电压越限损失量的变化,协调灵敏度指标的计算数值所有变化,但当区域性电压场中的协调灵敏度指标达到极限稳定状态后,电压越限损失量达到其极大值状态,当前情况下,

多级无功指标不再过度损失，智能配电网随之进入稳定供电状态。智能配电网多级无功功率的协调灵敏度可以理解对多个灵敏项指标的优化排列，规定 $h_1, h_2, \dots, h_n$ 表示 n 个不同的电网无功功率灵敏项指标，其计算表达式为

$$\begin{cases} h_1 = \eta_1 D - j_1^2 \\ h_2 = \eta_2 D - j_2^2 \\ \vdots \\ h_n = \eta_n D - j_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中， $j_1, j_2, \dots, j_n$ 为 n 个不同的越限电压冲突系数； $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 分别为与 $j_1, j_2, \dots, j_n$ 匹配的无功功率量化效率。

设 $\bar{\eta}$ 为 n 个无功功率量化效率指标的平均值，且其取值恒属于 $(0,1)$ 的数值区间； Δh 为单位时间内的电网无功功率累积量。联立式(3)，推导基于调压资源数据挖掘模型的智能配电网多级无功功率指标协调灵敏度计算表达式满足

$$H = \frac{h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2}{\bar{\eta} \times |\Delta h|} \quad (4)$$

由于智能配电网环境对于越限电压的承载能力有限，所以实施多级无功功率的联动协调时，协调灵敏度指标求解数值不具备无限增大的可能。

2. 联动越限电压

联动越限电压是指电压越限指标在智能配电网环境中的单位损失总量，在调压资源输出总量不为零的情况下，联动越限电压的计算数值越大，电网体系对于电压越限指标的承载能力越强。所谓联动越限就是指电压信号的非关联传输行为，随着极化电网复杂程度的增大，越限电压的求解数值会不断增大，但在对多级无功功率指标进行联动协调的过程中，单位越限系数的平均取值必须大于自然数1。设 $\dot{x}$ 为极化电压参量在智能配电网环境中的传输特征； λ 为联动参数； C 为电网无功功率指标的单位损失量； V' 为电压越限信号的瞬时损失速率，联立上述物理量，求解越限电压联动极化指标为

$$l < \sqrt{\left(\frac{C}{\lambda \dot{x}}\right)^2 - V'^2} \quad (5)$$

联立式(4)、式(5)，可将联动越限电压计算结果表示为

$$U' = H \cdot \left| k_{\max} - k_{\min} \right| / \left(l \times \bar{Z} \right) \tilde{K}^2 \quad (6)$$

式中， $k_{\min}$ 为无功功率压差的最小累积量； $k_{\max}$ 为无功功率压差的最大累积量； $\bar{Z}$ 为压感资源数据的单位累积量； $\tilde{K}$ 为电量感知特征。规定智能配电网环境中， $\tilde{K} \geq 1$ 、 $\bar{Z} \geq 1$ 的不等式条件同时成立。

3. 无功发生器响应特性

无功发生器闭环提供的越限电压可以在智能配电网环境中自由传输，当待调压资源数据存储量不发生改变时，无功发生器闭环输出的越限电压总量越多，智能配电网的无功联动协调处理行为也就越复杂。完整的无功发生器闭环结构如图2所示。

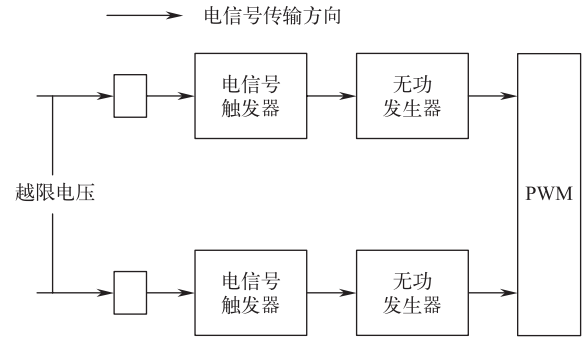


图2 无功发生器闭环

在图2所示发生器闭环结构中，设 θ 为PWM谐波调制系数； $\dot{B}$ 为与智能配电网主机匹配的无功功率信号感应特征值， ϑ 为协调压敏参量； ϖ 为电网无功功率指标的优化分配参数，在上述物理量的支持下，可将无功发生器响应特性条件定义为

$$m = \sqrt{\frac{U'}{\theta} \frac{\vartheta}{\dot{B}} + \varpi^2} \quad (7)$$

至此，完成对相关参数指标的计算与处理，在不考虑其他干扰条件的情况下，实现基于调压资源数据挖掘模型的智能配电网多级无功联动协调优化方法的顺利应用。

实例分析

1. 实验指标描述

电压越限损失量可以描述智能配电网主机对于无功功率指标的联动协调能力，在稳定的电网运行环境中，为满足主机对于传输电压的消耗需求，电压越限行为必然存在，故电压越限损失量指标的取值不可能为零。

电压越限损失量的求解表达式为

$$X = \frac{\xi \times \bar{R} - J}{\Delta L} \quad (8)$$

式中, ξ 为传输电压的消耗行为向量; $\bar{R}$ 为智能配电网环境中的平均内阻数值; J 为电机做功总量; ΔL 为越限电压的单位传输长度。

本次实验过程中, 越限电压的单位传输长度恒为1 m, 即 $\Delta L=1\ 000\ \text{mm}$ 的取值条件恒成立, 智能配电网环境中的平均内阻数值、传输电压消耗行为向量只与主机型号相关, 即平均内阻数值、电压行为向量始终保持不变, 故对电压越限损失量的计算只需考虑电机做功总量。

2. 实验步骤

相关实验设备型号及各项实验指标的具体数值见表1。

表1 实验设备与实验参数

项目	实验设备 (实验参数)	型号 (数值)
1	电网变压器/ (kV·A)	SCB13-800
2	无功发生器	KLD-SVG-50-4L-400 V-LRD 静止无功发射器
3	无功补偿元件	IGBT-500
4	电压比/V	380/600
5	额定功率/ (kV·A)	30
6	电源相数	单相
7	额定电压/kV	10
8	压电信号额定容量/ (kV·A)	2 000
9	绕组形式	三绕组
10	线圈个数	不少于3组

根据SCB13-800 kV·A电网变压器的工作特性可知, 其在平均内阻为5 000 Ω 的智能电网环境中, 可将传输电压消耗行为向量取值控制在1.89~2.31 J/s, 为减轻本次实验的数据计算压力, 控制传输电压消耗行为向量取值恒为2.0 J/s。

选择基于调压资源数据挖掘模型的智能配电网多级无功联动协调优化方法、主动优化调节、鲁棒优化调节策略作为三组实验方法, 在图3所示电网回路中, 分别利用上述三种方法对无功功率条件下的电机做功总量进行统计, 以用于对电压越限损失量的计算。

完成一次电量指标的测量后, 必须将KLD-SVG-50-4L-400 V-LRD静止无功发射器调节至初始连接状态, 才能进行第二次实验数据测量。

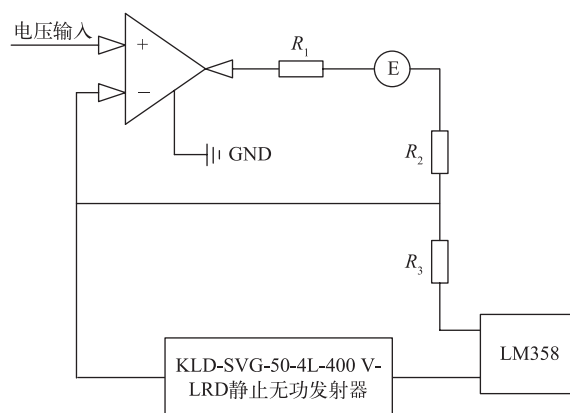


图3 实验电网回路

3. 结果分析

实验过程中无功功率条件下电机做功总量的数值变化情况如图4所示。

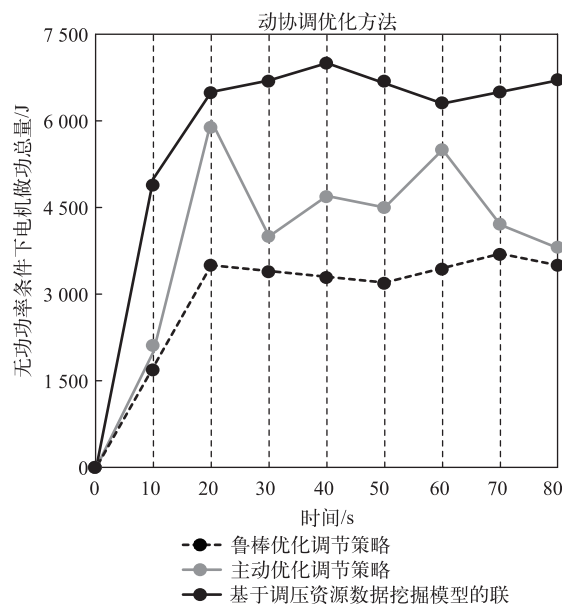


图4 电机做功总量

分析图4可知, 基于调压资源数据挖掘模型的联动协调优化方法作用下, 电机做功总量保持先上升、再下降、最后继续上升的数值变化态势; 主动优化调节策略作用下, 电机做功总量保持先上升、再来回波动的数值变化态势; 鲁棒优化调节策略作用下, 电机做功总量保持先上升、再小幅波动的数值变化态势。整个实验过程中, 无功功率条件下电机做功总量均值的排列顺序为: 基于调压资源数据挖掘模型的联动协调优化方法>主动优化调节策略>鲁棒优化调节策略。

分别选取三组实验方法作用下的电机做功总量

最大值对电压越限损失量进行计算。

1) 3.40 V/mm (本文的基于调压资源数据挖掘模型的联动协调优化方法)。

2) 4.18 V/mm (文献[3]的主动优化调节策略)。

3) 6.35 V/mm (文献[4]的鲁棒优化调节策略)。

综上所述,主动优化调节策略、鲁棒优化调节策略作用下,电机做功总量相对较少,导致智能配电网环境中电压越限损失量较大,无法实现对智能配电网的多级无功联动协调。基于调压资源数据挖掘模型的联动协调优化方法作用下,电机做功总量取值较大,可以有效控制电压的越限损失量,实现对智能配电网的多级无功联动协调。

结束语

智能配电网多级无功联动协调优化方法在调压资源数据挖掘模型的基础上,重新定义了数据挖掘模型,又通过求解无功功率补偿向量的方式,计算协调灵敏度、联动越限电压的具体数值,实现对无功发生器响应特性的准确分析。与主动优化调节策略、鲁棒优化调节策略相比,在基于调压资源数据挖掘模型的联动协调优化方法的作用下,电压越限损失量得到了有效控制,符合联动协调智能配电网多级无功功率的实际应用需求。EA

(收稿日期:2024-01-31)

参考文献

[1] 钟云南,曾智,郑蔚涛,等.基于数据挖掘技术的电能质量在线监测系统设计研究[J].微型电脑应用,2022(05):92-95+99.

[2] 蔡晓东,洪涛,曹艺.基于极化关系表述与低维数据间关联学习的推荐模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(1):122-131.

[3] 卢姬,常俊晓,张云阁,等.考虑DG不确定性的主动配电网两阶段无功机会约束优化方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(21):28-35.

[4] 李军,周冬冬,张玉琼,等.基于区块链技术的配电网分布式状态感知与优化[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(03):163-169+173.

[5] 孙峰洲,马骏超,于森,等.含多端柔性多状态开关的主动配电网日前-日内协调能量管理方法[J].中国电机工程学报,2020,40(03):778-790.

[6] 赵凤展,张启承,张宇,等.基于VMD-MPC法的并网型微电网多时间尺度能量协调优化调度[J].农业工程学报,2021,37(7):190-198.

[7] 张悦,任春雷.基于数据挖掘及聚类分析的主动配电网简化等值[J].中国测试,2022,48(3):163-168.

[8] 黄蔓云,卫志农,孙国强,等.数据挖掘在配电网态势感知中的应用:模型、算法和挑战[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6588-6598.

[9] 廖孟柯,樊冰,李忠政,等.基于改进Apriori算法的配电网设备退役信息挖掘[J].科学技术与工程,2021,21(24):10381-10386.

[10] 程江洲,聂玮瑶,张赟宁,等.基于FP-network关联规则挖掘算法的配电网薄弱点分析研究[J].电测与仪表,2021,58(3):47-53.

[11] 苏立伟,刘振华,苏华权,等.基于数据负荷序列聚类的配电网电力营销实时信息系统测试[J].电网与清洁能源,2021,37(12):64-69,80.

[12] 胡丹尔,彭勇刚,韦巍,等.多时间尺度的配电网深度强化学习无功优化策略[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5034-5045.

[13] 张忠会,雷大勇,李俊,等.基于自适应 ε -支配多目标粒子群算法的含SOP的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J].电网技术,2022,46(6):2199-2209.

[14] 王蒙,吕智林,魏卿.基于一致性算法的微网群协调控制[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(5):1143-1153.

[15] 孙文治,张惠娟,谢姿,等.含多微网系统的主动配电网分层能量优化管理[J].科学技术与工程,2022,22(1):202-210.

[16] 李国武,许健,吉小鹏.计及光伏的配电网多级无功联动协调优化[J].电网与清洁能源,2020,36(8):103-111.