

基于电能质量监测数据的电容器运行预警

文/国网商洛供电公司 李 强

建立了包括基波、谐波和峰值约束的统一电容器运行预警模型，并结合35 kV变电站实测电能质量数据进行了实际应用分析。分析表明：尽管目前电能质量监测数据信息仍然存在缺陷，但是该数据信息仍属于目前电力系统最全面的监测数据之一，在电气设备运行预警等专业领域有广阔的应用前景。

并联电容补偿装置属于电力系统及其用户的主要电气设备之一，由于其独特的频率负阻抗特性，使其在不断恶劣的电磁环境中极易发生元件损坏，且经常发生群爆故障。为了保证并联电容补偿装置的安全可靠运行，多年来，电力科技工作者研究开发了多种相关在线预警装置（系统）。陈晓宇等提出了一种初始矢量归零不平衡电流变化量法来预测电容器组内部元件早期故障，但该方法只适应双星形接线；段晓波等使用 SQL Server2008的SSAS建立了电容器组电容值预测模型，对电容值变化进行预测，但不适合电容器串联电抗器的接线方式；汤敏等通过对并联电容器安装电流传感器在线监测电容器电流值，得到电容器电容量的变化情况，进而用于电容器早期故障在线检测，但需要额外加装电流传感器；熊兰等首先建立并联电容器组的电路模型，再结合目前变电站内成熟的 SCADA系统计算电容值，但SCADA系统的电压电流值是谐波与基波的混合，计算结果误差较大。本文结合国家标准 GB/T 11024.1—2019《标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器 第1部分：总则》规定的电容器运行约束条件，建立包括基波、谐波统一考虑的电容器运行预警模型，应用目前变电站普遍安装的电能质量检测装置监测数据，开展电容器运行

预警。

电能质量监测数据应用于分析

结合欧洲电力管理委员会（The Council of European Electricity Regulator）的定义及IEC TR 62510的思路，电能质量议题涵盖下述范畴：商务质量、供电连续性、电压质量、电流质量和发电质量。

可见，电能质量现象及其指标包含了广泛的信息，电能质量指标及其衍生指标全面反映了负荷综合用电特性、能耗水平和管理水平，因此，基于电能质量指标及其衍生数据的挖掘应用具有广阔的专业领域与市场空间。

就电能质量环境与在该环境下运行的电气设备而言，无论是发（供）电设备还是用电设备，均运行在这样一种电磁环境下，也需要承受这样的电磁干扰，电气设备的潜在故障信息与所承载的电气环境有着不可分割的必然联系，因此，如何结合电能质量技术监督管理评估开展基于电能质量监测数据的设备预警，是电能质量监测数据挖掘应用的主要问题之一。

由于电能质量监测是基于IEC 61000-4-30的标准方法实现的，因此，在应用电能质量监测数据

时,也需要了解并理解监测方法给数据应用带来的限制。稳态电能质量指标(例如谐波、三相不平衡度等)要求采用固定要求的10周波采样窗,并在3 s/10 min时间内采用方均根值进行数据简约,因此,无论是10周波、3 s,还是10 min,在此时间简约周期的干扰瞬时信息实际上是丢失的,其结果数据只反映了其等效平均效应,因此,在事故分析、预警分析中需要充分理解监测结果包含信息的含义及其损失信息丢失的可能线索,尽可能采用较短时间间隔的监测数据,例如150周波数据记录。

尽管目前的电能质量监测数据存在信息丢失现象,但是仍属于目前电力系统最全面的监测数据之一,并不限制其在相关专业领域的挖掘应用;本文结合商洛供电公司开展的基于资产全寿命周期管理的并联电容器在线安全运行预警系统的研究与应用,探讨电能质量监测数据在电容器运行预警方面的实际应用。

基于电能质量监测数据的电容器在线预警研究

1. 考虑谐波因素的电容器运行容限曲线

电容器无功补偿及其所连接电网可等效为图1所示电路。

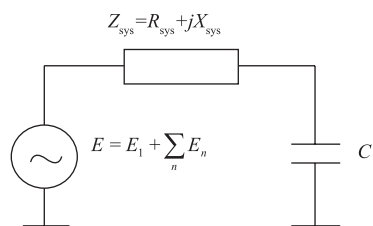


图1 谐波对电容器危害的Thevenin等效电路

图1中, $E = E_1 + \sum E_n$ ($E_n = a_n E_1$ 为 n 次谐波,其中, a_n 为各次谐波电压的背景含有率)为戴维南等效电路开路等效电压; Z_{sys} 为戴维南等效电路开路等效阻抗; C 为电容。

设: $E = E_1 + \sum E_n$, 同时考虑到国家标准GB/T 11024.1—2010(见表1)规定的电容器运行约束,则电容器的电压有效值、电压峰值、电流有效值和视在功率约束可用下式表示

$$\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n\right)^2} \leq 1.1 \quad (1)$$

$$1 + \sum_n \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n\right)^2 \leq 1.2 \quad (2)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n\right)^2} \leq 1.3 \quad (3)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n\right)^2} \sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n\right)^2} \leq 1.35 \quad (4)$$

式中, $\gamma_n = Y_n/Y_1$, Y_1 是补偿电容与电源开路阻抗共同作用(串联)的导纳; Y_n 是补偿电容与电源开路阻抗共同作用(串联)的谐波导纳; V_{c1} 是电容器端基波电压; V_{cn} 是电容器端 n 次谐波电压。

表1 电容器运行约束

指标	描述	限值
S	视在功率	$1.35S_{\text{rated}}$
V_{res}	电压有效值	$1.1V_{\text{res,rated}}$
V_{peak}	电压峰值	$1.2V_{\text{peak,rated}}$
I	电流有效值	$1.30I_{\text{res,rated}}$

依据式(1)~式(4)得到的 $\gamma_n - a_n$ 约束曲线如图2所示。分析图2可知:

- 1) 在所有约束中,电压有效值约束最为宽松,容量约束最为严酷。
- 2) 当由 (a_n, γ_n) 确定的电容器运行点位于曲线的下方时,该谐波环境水平 a_n 下电容器能够安全运行;反之,电容器将存在至少超出容限约束的风险。实践中可依次对谐波环境下的电容器安全运行进行预警。

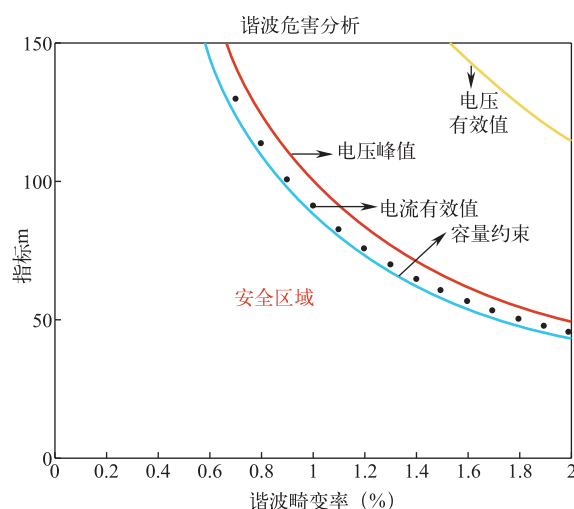


图2 考虑谐波因素的电容器运行容限曲线示意图

2. 考虑串联电抗器的电容器运行容限曲线

考虑串联电抗器后,图1可转化为图3。

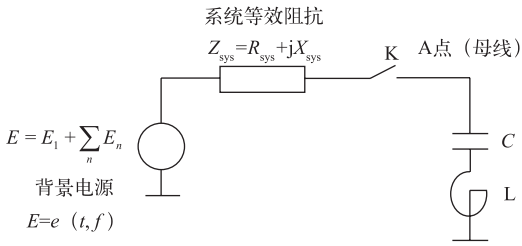


图3 考虑串联电抗器的电容器无功补偿Thevenin等效电路

设电容器串联电抗器组实测基波电压为 V_{CL1} ， $k_u = V_{CL1} / U_N$ ，则电容器端基波电压为

$$V_{cl} = \frac{1}{1-k} V_{CL1} \tag{5}$$

$$V_{res, rated} = U_N = V_{CL1} / k_u = \frac{1-k}{k_u} V_{cl} = \frac{1-k}{k_u} \left(\frac{E_1 Y_1}{\omega_1 C} \right) \tag{6}$$

式中， k 为串抗率； U_N 为电容器额定相电压。

考虑到式（5）、式（6），电容器额定容量可表示为

$$S_{rated} = U_N I_N = \frac{1}{k_u k_i} V_{CL1} I_{C1} = \frac{1-k}{k_u k_i} \frac{(E_1 Y_1)^2}{\omega C} \tag{7}$$

则式（4）可进一步表示为式（8），可依次进行串联电抗器运行模式下的电容器预警

$$a^4 \gamma^4 \left(m \sum_{n=k_1, k_2, \dots} \left(\frac{1}{n} \right)^2 \right) + a^2 \gamma^2 \left(\sum_{n=k_1, k_2, \dots} \left(\frac{1}{n} \right)^2 + m \right) + (1 - (1.35 \frac{1-k}{k_u k_i})^2) = 0 \tag{8}$$

式中， n 为谐波次数； $k_1, k_2, \dots$ 为要考虑的主要谐波次数，例如3、5、7等次谐波； m 为可考虑谐波频谱个数，例如考虑3、5次谐波，则 $m=2$ 。

实测数据分析

本节以35 kV照川变2018年4月4日10时00分至2018年4月20日13时20分的谐波数据为例进行分析。

1. 该站谐波水平

（1）谐波电压

总谐波电压畸变率统计结果及结论见表2。三相谐波电压含有率统计对应柱状图如图4所示。

表2 谐波电压总畸变率测试结果

名称	单位	最大值	最小值	平均值	95%概率率大值	超限值	超限次数	合格率
AB	%	3.699	0.530	1.142	1.674	4	0	100.00
BC	%	3.902	0.503	1.150	1.710	4	0	100.00
CA	%	2.073	0.478	0.931	1.378	4	0	100.00

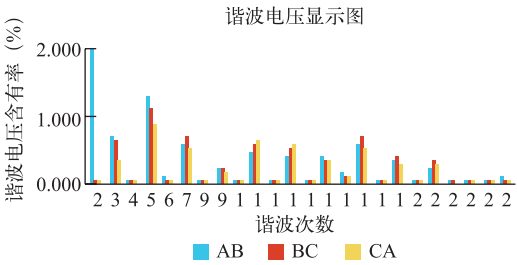


图4 电容器（电压等级：10 kV）三相谐波电压含有率

（2）谐波电流

三相谐波电流测试值统计结果对应柱状图如图5所示。

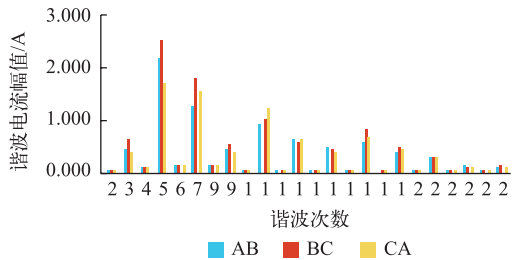


图5 电容器三相谐波电流（电压等级：10 kV）

（3）谐波水平评价

通过监测数据分析，可得出如下结论：

- 1) 该线路电能质量总体水平合格。
- 2) 谐波电压、电流频谱表现为典型的整流负荷特征，即频谱为 $6k \pm 1$ 。

2. 预警结果

谐波对电容器运行的预警分析结果如图6、图7所示。分析可见：

1) A、B、C三相不同程度出现了5次谐波导致的过容预警。

2) B相出现的预警次数较A、C相频繁。

因此，应进一步密切关注5次谐波对电容器安全运行的影响。

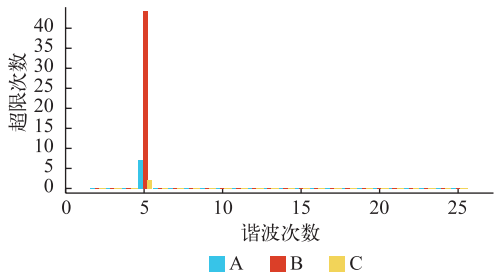


图6 谐波容限预警次数示意图

（下转第88页）

然后与Rete中网络的具体事件进行匹配检索，进而进行原则运算，将具体步骤融入到知识实时库之中，最终输出结果。

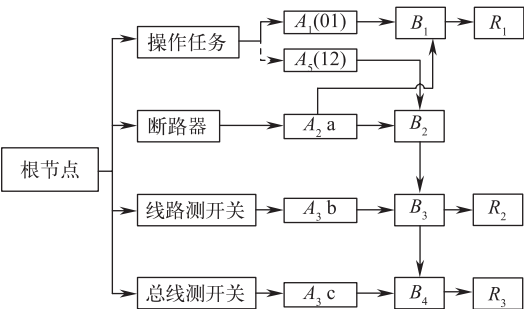


图3 Rete算法网络图

结束语

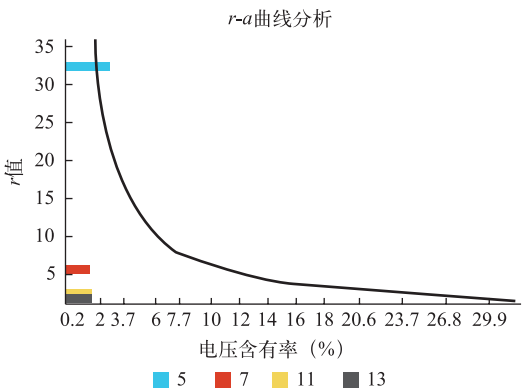
针对电力调度系统压力中的传统操作票不能胜任实际生产的问题，本文基于人工智能中专家系统的应用采用Rete算法，研究设计出了一个表达方式更为简便、知识内容更为详实的知识库，并通过研

究构成操作票专家系统的知识库与推理机，完善了专家系统的设计，为电网操作票的研究带来新的方式方法，得到的主要结论有以下几点：

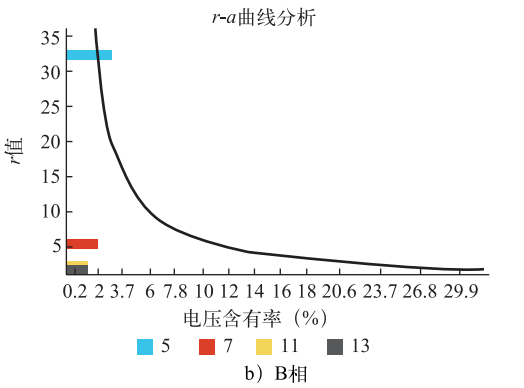
- 1) 通过将人工智能融入到电力调度系统中，可以巧妙地采用专家系统、可视化技术以及人工神经网络技术将海量的信息进行更有效率的处理，提高电力调度故障排除效率，保证电力调度系统稳定运行。
- 2) 通过将专家系统应用到电网调度运行单后，本文采用模块化的方式将交换机运行单专家系统设计出来，此设计方案能使各个模块之间协同完成操作票的自动生成，具有高效可靠的优点。
- 3) 由于模块化的方法令此操作逻辑具有良好的可移植性能，基于此，本文所展示的算法不仅能应用在操作票上，更能为其他智能系统的开发与拓展提供真实可靠的逻辑处理，在保证安全无误的同时，将设计成本大幅度削减，有利于日后系统的开发设计。EA

(收稿日期：2021-10-29)

(上接第60页)



a) A相



b) B相

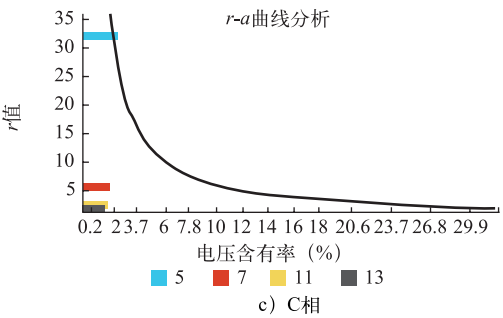


图7 谐波危害容限预警结果

结束语

尽管电能质量监测数据存在信息丢失现象，但该数据仍然是目前电力系统最全面的监测数据类型之一，就电能质量环境与在该环境下运行的电气设备而言，无论是发（供）电设备还是用电设备，其潜在故障信息与所承载的电气环境之间有着不可分割的必然联系，基于电能质量监测数据开展电气设备运行预警具有广阔的前景，文章所列举的电容器预警应用进一步表明了电能质量监测数据的应用价值。EA

(收稿日期：2021-12-27)