

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180951

基于支持向量回归的直流受端电网动态无功需求在线评估

刘俊磊¹, 钱峰¹, 伍双喜¹, 杨银国¹, 孙百哲²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600;

2. 北京清大高科系统控制有限公司, 北京 102208)

摘要: 暂态电压稳定性已经成为直流受端电网安全的重要威胁之一, 实时在线的动态无功源管理和控制是应对这一挑战的有效手段。因此, 有必要研究直流受端电网的动态无功需求在线评估技术, 量化评估动态无功设备对电网暂态电压稳定性的支撑作用。以往, 主要依赖时域仿真法对大电网的暂态电压稳定性进行分析, 由于计算耗时较长等原因导致其在线应用受限。针对这一问题, 提出了基于支持向量回归(SVR)的直流受端电网动态无功需求在线评估方法。首先, 建立了能够量化评估电网暂态电压稳定性的 STVSI-SVR 模型, 然后提出了以该模型为基础的动态无功储备评估算法。相比于传统的基于时域仿真的分析方法, 该算法能够快速计算出合理的结果, 满足在线应用的需求。最后在我国某实际受端电网模型上测试了算法的有效性。

关键词: 无功储备需求; 在线评估; 支持向量回归; STVSI-SVR 模型

Online evaluation of dynamic reactive power demand of DC receiving power grid based on SVR

LIU Junlei¹, QIAN Feng¹, WU Shuangxi¹, YANG Yinguo¹, SUN Baizhe²

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Power Dispatching Control Center, Guangzhou 510600, China;

2. Beijing Qingda Gaoke System Control Co., Ltd., Beijing 102208, China)

Abstract: Transient voltage stability has become one of the important threats to the safety of DC receiving power grids. Real-time online dynamic reactive power source management and control is an effective means to cope with this challenge. Therefore, it is necessary to study the dynamic evaluation of dynamic reactive power demand of DC receiving power grid, and quantitatively evaluate the supporting role of dynamic reactive power equipment on grid transient voltage stability. In the past, it mainly relied on the time domain simulation method to analyze the transient voltage stability analysis of large power grids. It is difficult to realize online application due to the long time consumption of calculation. In response to this problem, this paper proposes an online evaluation method for dynamic reactive power demand of DC receiving power grid based on Support Vector Regression (SVR). Firstly, the STVSI-SVR model which can quantitatively evaluate the transient voltage stability of the power grid is established, and then the dynamic reactive reserve evaluation algorithm based on this model is proposed. Compared with the traditional time domain simulation based analysis method, the algorithm can quickly calculate reasonable results and meet the needs of online applications. At the end of the paper, the effectiveness of the algorithm is tested on a practical receiver network model in China.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Ltd. (No. GDKJ00000060).

Key words: reactive reserve demand; online evaluation; support vector regression; STVSI-SVR model

0 引言

由于我国东西部地区能源资源分布不均, 现已

形成了西电东送的整体电力供需格局。高压直流输电(HVDC)在大容量远距离输电方面有显著的优势, 因此在东部负荷地区形成了多个大型受端交直流混联网^[1]。HVDC 输电线路需要消耗大量的无功功率, 约为其传输有功功率的 40%~60%。在稳态时, 换流器所需无功功率通常由换流站内电容电抗器及滤波器补偿, 但当换流器发生换相失败时, 其动

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助 (GDKJ00000060) “直流多落点受端电网动态无功备用评估及协调控制研究”

态无功需求可能是稳态时的数倍,换流站内部无功补偿无法满足换流器需求,因此需要从交流电网吸收大量的动态无功,对直流受端地区交流电网的暂态电压稳定性产生较大冲击^[2-3]。如果交流电网动态无功资源不足,可能导致换流器连续换相失败,进而引发直流系统闭锁。文献[4]中记载了我国电网实际运行中的直流双极闭锁案例。2013年8月19日,由于交流系统中发生了大扰动,导致林枫直流发生了双极闭锁故障并损失功率约1720 MW^[4]。所以,迫切需要研究直流受端电网动态无功设备的评估与控制问题。

以调相机、静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器(STATCOM)为代表的动态无功设备具有快速响应能力,可以有效地改善电网的暂态电压响应特性^[5-9]。已有一些文献研究了直流受端电网动态无功需求的评估方法,以提升电网的暂态电压稳定性。文献[10]提出了一种基于改进粒子群算法的交直流电网无功补偿优化方法,文献[11]提出了一种针对交直流混联系统的电力系统无功备用优化模型,文献[12]提出了一种考虑换流站详细损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制方法,文献[13]研究了柔性交流输电系统装置容量限制对电压稳定的影响,文献[14]提出了考虑增大无功备用容量、减少网络损耗以及减小电压偏移的多目标无功优化调度算法,文献[15]提出了一种在系统暂态过程中考虑暂态电压安全的无功备用概念。

已有的动态无功备用评估方法,均基于时域仿真计算进行。但是对于大型受端电网来说,仿真计算耗时过长是限制其在线实时应用的重要瓶颈。而对于直流受端电网来说,直流线路及落点地区交流电网的运行工况出现变化时会影响动态无功备用评估的结果,离线分析的计算结果对实时调度运行的参考价值有限,进行动态无功备用的在线评估是十分必要的。因此,计算速度是动态无功备用评估在线应用的核心挑战之一。

为应对这一挑战,本文提出了基于支持向量回归的直流受端电网动态无功需求在线评估方法,主要贡献包括以下三个方面:首先,提出了一种能够连续量化评估电网暂态电压稳定性的指标(STVSI);然后,基于支持向量回归(SVR)构建了能够快速计算电网 STVSI 指标的 STVSI-SVR 模型,以替代时域仿真。最后,介绍了基于 STVSI-SVR 模型的电网实时动态无功需求评估算法。

本文的主要内容如下。在第1节中,提出了一种量化评估电网暂态电压稳定性的指标(STVSI)。在

第2节中,首先简要介绍了支持向量回归(SVR)算法,然后构建了能够快速计算电网 STVSI 指标的 STVSI-SVR 模型。在第3节中,提出了基于 STVSI-SVR 模型的电网动态无功需求的计算方法。在第4节中,阐述了动态无功需求评估算法的在线应用框架。在第5节中,基于某实际直流受端电网模型进行测试,验证了算法的有效性。在第6节中,阐述了本文的结论和展望。

1 电网暂态电压稳定指标(STVSI)

进行电网无功储备评估的目的在于改善电网大扰动下的暂态电压稳定性,需要一个能够连续量化评估暂态电压稳定或不稳定程度的指标。而电网中常用的暂态电压稳定判据都是 0/1 量,仅能给出电网稳定或不稳定的离散判断结果。表1所示^[16-19]是世界范围内几个大型电网采用的工程实用化暂态电压稳定判据。

表1 电网暂态电压稳定判据

电网公司	暂态电压稳定判据
国家电网	故障清除后,电压在10 s内恢复到0.8 p.u. 电压低于0.75 p.u.持续的时间不超过1 s,
南方电网	稳定后电压不低于0.9 p.u.
WECC	电压跌落20%的持续时间不超过20周波
TVA	故障清除后,电压在0.5 s内恢复到0.9 p.u.

本节中,将首先提出一个评估单个母线暂态电压稳定的量化指标 BTVSI,进一步介绍一个评估区域电网暂态电压稳定的量化指标 STVSI。

1.1 母线电压暂态稳定指标(BTVSI)

如表1所示,电网运行中常用的暂态电压稳定判据均为基于扰动后母线电压轨迹进行判断的,其数学形式具备相对一致性,某一母线“暂态电压稳定”的要求是“电压低于某一阈值(V_{th})持续的时间不能超过某一阈值(T_{th})”。表1中的各暂态电压稳定判据对应的 V_{th} 和 T_{th} 如表2所示。

表2 各暂态电压稳定判据对应的 V_{th} 和 T_{th}

电网公司	V_{th}	T_{th}
国家电网	0.8 p.u.	10 s
南方电网	0.75 p.u.	1 s
WECC	故障前的80%	0.33 s
TVA	0.9 p.u.	0.5 s

参考实际中常用的暂态电压稳定判据,本文提出的 BTVSI 表达式为

$$S_{T_{\text{span}}} = \left\{ \{t_1, t_2\} \left| \begin{array}{l} v(t_1) = v(t_2) = V_{\text{th}}, 0 \leq t_1 < t_2 \leq T_{\text{end}} \\ \forall t \in [t_1, t_2], v(t) < V_{\text{th}} \end{array} \right. \right\} \quad (1)$$

$$T_{\text{span,max}} = \begin{cases} \max(t_2 - t_1), \{t_1, t_2\} \in S_{T_{\text{span}}} & \text{if } S_{T_{\text{span}}} \neq \emptyset \\ 0 & \text{if } S_{T_{\text{span}}} = \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

$$BTVSI = T_{\text{span,max}} / T_{\text{th}} \quad (3)$$

式(1)中: $S_{T_{\text{span}}}$ 是电压轨迹中电压值持续低于 V_{th} 的时间段的集合; $v(t)$ 是电压轨迹; T_{end} 是电压轨迹结束对应的时刻; t_1 和 t_2 是电压轨迹中的两个时刻。式(2)中, $T_{\text{span,max}}$ 是 $S_{T_{\text{span}}}$ 中电压值低于 V_{th} 持续时间最长的时间段。式(3)中, $BTVSI$ 是母线的暂态电压稳定指标, 是 $T_{\text{span,max}}$ 与 T_{th} 的比值。

V_{th} 和 T_{th} 的值可以根据实际需求来选择。例如, 在分析广东电网的暂态电压稳定性时, 可以设 V_{th} 为 0.75 p.u., 设 T_{th} 为 1 s。 $BTVSI$ 的值越大, 说明 $v(t)$ 的暂态电压稳定性越差。如果 $BTVSI$ 大于 1 时, 说明 $v(t)$ 不满足所选择的暂态电压稳定判据, 即母线暂态电压失稳。

1.2 区域电网电压暂态稳定指标(STVSI)

当评估一个区域电网的暂态电压稳定性时, 应该综合考虑该区域内遭遇各类预想故障情况下各条母线电压的暂态电压稳定性。在预想故障选择层面, 由于本文的主要研究目标是评估动态无功储备对暂态电压稳定性的影响, 因此考虑以电压崩溃为主要特征的失稳故障, 而导致电网功角失稳的预想故障不在本文的研究范畴。在母线选择方面, 在我国实际电网进行运行方式安全稳定校核计算时通常把负荷折算到 220 kV 侧。因此, 本文中仅考虑 220 kV 等级以上母线的 $BTVSI$ 指标, 不考虑低电压等级母线的 $BTVSI$ 指标。

根据上文所述, 选择相应的预想故障与负荷母线范围, 计算区域电网暂态电压稳定性评价指标 $STVSI_j$, 如公式(4)所示。

$$STVSI_j = \max_i BTVSI_{i,j} \quad (4)$$

式中: $BTVSI_{i,j}$ 是在故障 j 下母线 i 的 $BTVSI$ 指标; $STVSI_j$ 是故障 j 下电网的 $STVSI$ 指标。 $STVSI_j$ 指标的物理含义是预想故障 j 下暂态电压稳定性最差的负荷母线的 $BTVSI$ 指标。

1.3 对 STVSI 指标的讨论

本文提出的 $STVSI$ 指标的特点如下:

1) $STVSI$ 指标仅依靠母线的电压轨迹来计算。母线的电压轨迹的来源很多, 例如数值仿真结果、PMU 量测数据等。因此, $STVSI$ 指标比基于理论分析的方法(例如暂态能量函数法)的应用范围更广。

2) $STVSI$ 指标是连续、量化的, 因此能够描述

母线暂态电压稳定的程度, 并用于无功储备优化的目标函数和约束。无功储备优化通常可以离线进行, 因此计算 $STVSI$ 指标需要的母线电压轨迹可以通过数值仿真获得。

3) $STVSI$ 指标实现了对母线电压轨迹的量化表达, 并能够综合地评估暂态电压安全性, 因此它可以用于电力系统中的其他实际问题(例如确定电力系统中的暂态电压稳定薄弱区域)。

现有的工程用指标都是 0/1 量, 既不能有效地筛选出严重故障, 也不能有效地评价控制措施的效果(例如调整动态无功储备), 因此不能应用于优化动态无功储备的问题中。相比之下, $STVSI$ 指标是连续、量化的, 因此能够有效地筛选出严重故障和评价控制措施的效果, 能够用于动态无功储备优化。

2 快速计算电网 STVSI 的 SVR 模型

在事前对直流受端电网暂态电压稳定性进行评估时, 需要通过大量的时域仿真获得各个预想故障后的暂态电压波形, 进而计算得到电网 $STVSI$ 数值。对于大型受端电网来说, 当需要考虑的预想故障较多时, 计算一次 $STVSI$ 指标的耗时较长。

本文的目标是进行电网动态无功储备评估, $STVSI$ 指标将作为调整动态无功源所要改善的目标, 进行一次动态无功储备评估需要进行多次 $STVSI$ 指标的计算过程, 如果基于时域仿真计算该指标, 计算耗时是限制该指标在线应用的关键因素。因此, 本章将介绍一种快速计算电网 $STVSI$ 的 SVR 模型, 克服基于时域仿真进行 $STVSI$ 指标计算耗时长的难点, 提升在线应用的适用性。

2.1 支持向量回归(SVR)

支持向量机(SVM)是基于统计学习理论提出的一种机器学习方法^[20], 并已应用于解决电力系统稳定性判别问题^[21]。把 SVM 用于解决回归问题即为支持向量回归(SVR)。SVM 算法采用了结构风险最小化策略, 与传统的经验风险最小化策略不同, 具有良好的泛化能力。此外, SVM 算法在处理非线性分类问题时引入了核函数, 将非线性问题转化成高维空间的线性问题, 简化了问题求解的难度, 并且能克服局部最小值问题。

在应用 SVR 时, 需要注意如下问题: (1) SVR 的性能与其输入特征选取得合适与否密切相关, 在构建输入特征时需要去除冗余和不相关特征, 本文采用基于互信息的方法筛选关键特征; (2) 训练 SVR 时要将样本集分成训练集、交叉验证集和测试集, 以避免过拟合; (3) SVR 的性能受参数影响较大^[21], 需要进行参数寻优。

2.2 电网暂态稳定评估结果的离线样本库

快速计算电网 STVSI 的 SVR 模型的样本库以电网的运行方式和故障为输入量,取电网中 220 kV 等级及以上的母线的有功出力(P_g)、无功出力(Q_g)、有功负荷(P_l)、无功负荷(Q_l)、电压幅值(V)、电压相角(θ)、无功设备容量(S_q)和电网中预想故障的编号(k)为样本的输入,取电网的 STVSI 指标为样本的输出。参照某区域电网在运行方式安全稳定校核计算中的算法,本文把 220 kV 以下母线的 P_g 、 Q_g 、 P_l 、 Q_l 和 S_q 都整合到 220 kV 侧。某一样本内容的示意图如图 1 所示。

样本输入量		样本输出量
运行方式相关量	故障相关量	
母线1的 $P_g, Q_g, P_l, Q_l, V, \theta, S_q$	故障的编号 k	电网的STVSI指标 (对应 n 个母线, 1个故障)
母线2的 $P_g, Q_g, P_l, Q_l, V, \theta, S_q$		
⋮		
母线 n 的 $P_g, Q_g, P_l, Q_l, V, \theta, S_q$		

图 1 某一样本内容的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a sample content

本文用中国电科院开发的 PSASP 软件对电网做数值仿真。构建离线样本库的流程如图 2 所示。在构建样本库之前,要先定义基态运行方式和故障集。为了确保所建立模型的泛化能力,在生成样本时从基态运行方式的邻域随机选取合理的运行方式。

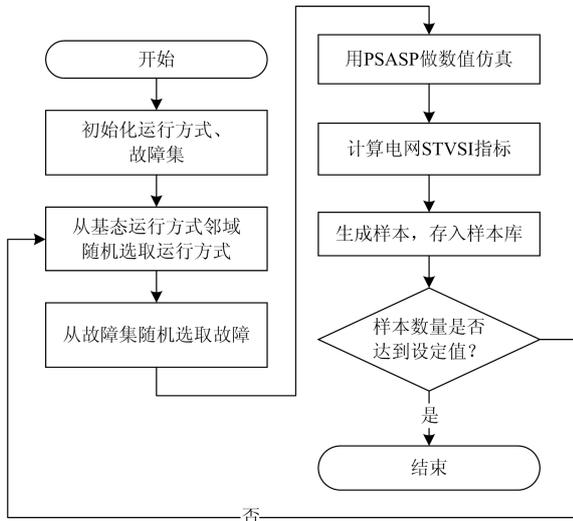


图 2 构建离线样本库的流程

Fig. 2 Process to construct an off-line sample set

本文中,基于一些常用的规则来约束所选取的运行方式。例如: P_g 、 Q_g 、 P_l 和 Q_l 与基态相比变化量不超过 20%, S_q 为基态值的 0~10 倍, P_g 、 Q_g 、 V 不越限等。此外,考虑到实际电网运行时追求经济性和安全性,而不是随机地设定运行点。因此,本文生成样本用的运行方式都在邻域选取的运行方式做了修改,在一定程度上考虑了自动发电控制(AGC)和自动电压控制(AVC)的作用,使得生成的样本更加合理。

样本生成的过程会循环地执行,直到样本的数量达到设定值。为了确保所建立模型的性能,样本数量要大于样本特征数量的 10 倍。

2.3 暂态电压稳定关键特征选择

电网的电压稳定问题是区域性的。一个故障只会显著影响其附近区域的暂态电压稳定性,而且该故障下电网的 STVSI 指标主要受该故障附近区域运行状态的影响。因此,某一故障下电网的 STVSI 指标用该故障附近区域的运行状态量即可近似确定。从全电网的运行状态量中选出与某一故障强相关部分的过程,就是针对该故障的特征选择。

对于机器学习算法,如果输入数据中包含不相关或冗余信息,将直接影响分类器的性能,有必要选择出各故障对应的关键特征量。

本文采用基于互信息的特征选择算法,该方法采用互信息对两个变量之间依存关系进行量化描述^[22],同时用候选特征与已选特征的相关性进行惩罚,简单且有效。基于互信息的特征评价函数为

$$J(f) = I(STVSI; f) - \beta \sum_{s \in S} I(s; f) \quad (5)$$

其中: $STVSI$ 是样本的指标; f 是候选特征; S 是已选特征的集合; $I(STVSI; f)$ 是 $STVSI$ 与 f 的互信息; $I(s; f)$ 是某个已选特征 s 与 f 的互信息,作为惩罚项; β 是调节系数,当 $\beta \in [0.5, 1]$ 时,算法性能较好。

对于故障集中的每个故障,首先按式(5)依次计算各运行状态量的 $J(f)$,然后把各运行状态量按 $J(f)$ 从大到小依次排列,最后选出前若干个状态量作为该故障的暂态电压稳定关键特征。

2.4 基于 SVR 的电网 STVSI 指标计算模型

不同预想故障对应的关键特征各不相同,因此需要对每个故障分别建立相应的 SVR 模型。各 SVR 的输出是电网在某一预想故障下的 STVSI 指标。为了得到电网对应于全部故障的 STVSI 指标,需要对各 SVR 的输出取最大值。基于 SVR 计算电网 STVSI 指标的模型示意图如图 3 所示。

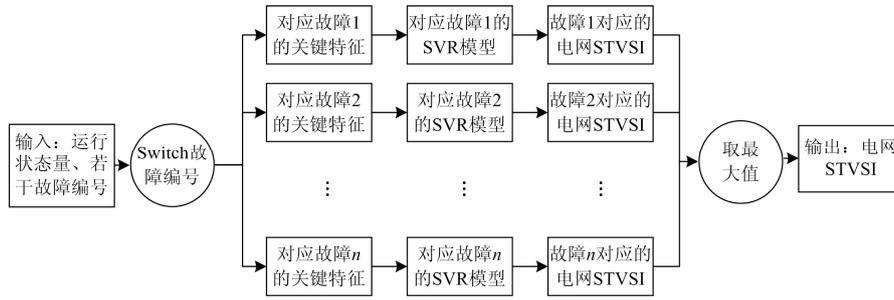


图3 基于 SVR 计算电网 STVSI 指标

Fig. 3 Calculate STVSI of a power grid based on SVR

基于 SVR 计算电网 STVSI 指标的模型(以下简称: STVSI-SVR 模型)的输入是某个运行方式的运行状态量和某些故障, 输出是电网对应于该运行方式和这些故障的 STVSI 指标。

STVSI-SVR 模型的结构与组合 SVR 模型相似。在输入了运行状态量和故障集的故障编号之后, STVSI-SVR 模型首先根据故障编号选择相应的关键特征、SVR 模型, 然后分别计算各故障对应的 STVSI 指标, 最后对各故障对应的 STVSI 取最大值并输出。

在训练 STVSI-SVR 模型时, 对各个子 SVR 模型分别训练。每个子 SVR 模型的输入是某一故障对应的关键特征量, 训练用的样本是该故障对应的样本。因此, 每个子 SVR 模型的规模都比较小, 训练样本也比较少, 可以在比较短的时间内完成训练。各个 SVR 模型的训练可以并行地进行, 因此在计算资源充足的前提下可以实现较短时间完成 STVSI-SVR 模型的训练。

本文定义子 SVR 模型的评价函数为

$$Cost = \left| \frac{(STVSI - STVSI')}{STVSI} \right| \quad (6)$$

其中: $STVSI$ 是某一个样本中记录的指标真实值; $STVSI'$ 是 SVR 模型对该样本的指标预测值。子 SVR 模型的评价函数被定义为 $STVSI$ 指标的预测值与真实值之间的相对误差。

对训练样本的预处理、训练 SVR 模型和调优 SVR 模型的参数都有成熟的算法, 一些常用的算法在第 2.1 节中做了简要介绍, 在此不再赘述。

3 基于 SVR 的动态无功需求评估算法

3.1 动态无功储备对电网 STVSI 指标的灵敏度

量化评估动态无功设备对电网暂态电压稳定的作用是计算电网动态无功需求的关键。一些文献^[23]中采用了轨迹灵敏度方法。本文中, 采用动态无功设备对电网 STVSI 指标的灵敏度来量化评估动态无功设备对电网暂态电压稳定的作用。由于

STVSI-SVR 是一种机器学习模型, 难以写出解析表达式, 故采用扰动法来计算动态无功设备对电网 STVSI 指标的灵敏度。

本文中, 把调相机、静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器(STATCOM)等都看作动态无功设备。由于电压稳定问题是区域性的, 所以要分区地评估无功需求才是合理的。实际运行中, 稳态电压控制也是分区进行的。本文中, 把自动电压控制(AVC)中的二级电压分区结果用于动态无功需求评估。

本文中, 把动态无功设备的容量作为扰动量, 而且让同一个分区内各动态无功设备容量同比例地增加或减少。因此, 如果确定了分区内动态无功设备容量的总扰动量, 则能唯一地确定分区内各动态无功设备容量的扰动量。

例如, 假设某区域内的动态无功设备容量分别是 $S_{q0}, S_{q1}, \dots, S_{qn}$, n 是动态无功设备的数量。如果区域内动态无功设备容量的总扰动量为 ΔS_q , 则分配给第 i 个设备的扰动量表达式为

$$\Delta S_{qi} = \frac{S_{qi}}{\sum_{i=1}^n S_{qi}} \Delta S_q \quad (7)$$

因此, 计算分区无功设备容量的总扰动量对电网 STVSI 指标的灵敏度即可, 其计算表达式为

$$S_{STVSI, S_q} = \frac{STVSI(S_q + \Delta S_q) - STVSI(S_q - \Delta S_q)}{2\Delta S_q} \quad (8)$$

其中: S_q 是分区内动态无功设备总容量; $STVSI(S_q + \Delta S_q)$ 是当总扰动量为 ΔS_q 时电网的 STVSI 指标; $STVSI(S_q - \Delta S_q)$ 是当总扰动量为 $-\Delta S_q$ 时电网的 STVSI 指标。

3.2 基于 SVR 的区域电网动态无功需求评估

如果电网的 STVSI 指标大于 1, 则说明电网在某个故障下存在不满足所选择的暂态电压稳定判据, 即电网在故障集下会暂态电压失稳。反之, 则

说明电网在故障集下暂态电压稳定。因此，当电网的 STVSI 指标等于 1 时，可认为电网的暂态电压稳定处于临界状态。

理论上来说，电网在暂态电压稳定临界状态时的动态无功配置是其动态无功的需求量。如果在实际运行中需要留一些裕度，可以把 STVSI 指标的调整目标设定为小于 1 的值。动态无功需求的算法如图 4 所示。

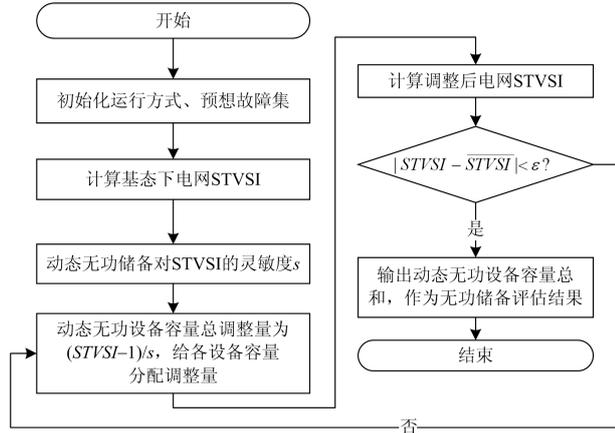


图 4 计算区域电网动态无功需求的流程

Fig. 4 Process to calculate the dynamic VAR requirement of regional power grids

每一次迭代中动态无功设备的扰动量是基于 $s_{STVSI,Sq}$ 和 $STVSI$ 的线性估计，表达式为

$$\Delta S_q = (STVSI - 1) / s_{STVSI,Sq} \quad (9)$$

在计算出 ΔS_q 之后，根据式(7)可以计算出分配给各设备的扰动量。

通过迭代，可以使电网的 $STVSI$ 指标逐渐接近设定值(\overline{STVSI})。ε 是预设的误差限值，取 $\varepsilon = 1e-3$ 可以得到比较理想的评估结果。当电网的 $STVSI$ 指标与设定值的差小于预设的误差限值时，停止迭代并输出动态无功需求的评估结果，即当前动态无功设备总容量。

4 电网动态无功需求的在线评估

在线评估电网动态无功需求是分区域进行的，其算法如图 5 所示。

在线评估电网动态无功需求的算法可分成离线部分和在线部分。离线部分周期性地更新用于在线部分的 STVSI-SVR 模型，在线部分用离线部分提供的 STVSI-SVR 模型周期性地计算电网动态无功需求。

图 5 中，比较耗时的步骤包括离线部分的更新

离线样本库、更新各故障的关键特征和更新 STVSI-SVR 模型；而在线部分的评估电网动态无功需求是基于训练好的 STVSI-SVR 模型完成的，耗时较少。

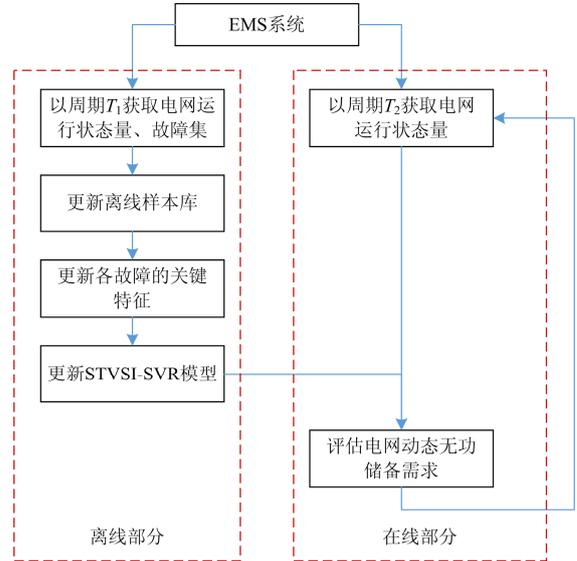


图 5 在线评估电网动态无功储备需求的算法

Fig. 5 Method to online assessment of dynamic VAR requirement of power grids

由于 STVSI-SVR 模型有一定泛化能力，所以离线部分选取比较长的更新周期，例如 1 h；而电网的动态无功需求随电网运行状态不断改变，所以在在线部分选取比较短的更新周期，例如 5 min。因此，本文提出的算法既能周期性地更新 STVSI-SVR 模型以确保评估结果的准确性，同时能满足在线应用对计算速度的要求。

5 算例分析

本文算例基于我国某直流受端电网。该电网包含 2 200 多个 220 kV 以上电压等级的母线，样本的输入特征数量超过 15 000 个，无法直接用于训练 SVR 模型，需要进行特征选择。

实际运行中，该受端电网中某直流换流站的附近区域电网暂态电压稳定性薄弱，其中的 500 kV 母线的接线图如图 6 所示。

该直流换流站近区中包含 10 个 500 kV 母线、85 个 220 kV 母线，可作为一个电压控制区域进行分析。其中，B9 是直流换流站母线。本文中，将对该直流换流站近区(以下简称：直流近区)的动态无功需求进行评估。采用 PSASP 软件做数值仿真，测试用的计算机配置了 core i7 6700U 的 4 核心 8 线程 CPU 以及 32 G 内存。

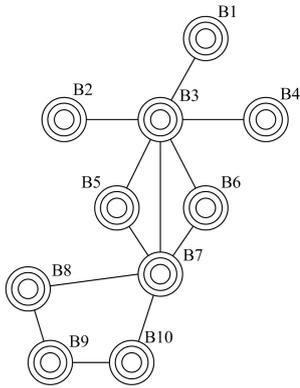


图 6 某直流换流站近区 500 kV 母线接线图

Fig. 6 Single-line diagram of 500 kV buses near DC converter station

第 1 步, 利用 PSASP 软件生成离线样本库。本文中, 考虑了该直流近区内的 5 个 $N-1$ 故障。为每个故障生成 500 个与之对应的样本, 则需要生成的样本总数为 2 500 个。在测试计算机上, 生成一个样本耗时约为 3~5 s。用 6 个线程并行的生成样本, 则生成离线样本库总耗时约 2 000 s, 小于离线样本库的更新周期。如果使用并行计算能力更强的计算机, 则可以在更短的时间内完成样本生成。

第 2 步, 提取该直流近区内故障对应的暂态电压稳定关键特征。本文中, 按照前文所述的方法给每个故障选择出 50 个关键特征。值得注意的是, 如果给故障选择的关键特征的数量是固定的, 则能够在电网运行方式改变时保持 STVSI-SVR 模型中的子 SVR 模型的结构不变, 进而减少更新 STVSI-SVR 模型需要的时间。对于本文的算例, 经过数次尝试, 发现把关键特征的数量设定为 50, 可使 STVSI-SVR 模型在性能和更新速度方面都有良好的表现。

第 3 步, 建立并训练子 SVR 模型, 组合成 STVSI-SVR 模型。各子 SVR 模型的输入维度只有 50, 样本数只有 500 个, 所以训练子 SVR 模型用的时间远低于生成样本用的时间。在测试计算机上, 训练一个 SVR 模型耗时约 30 s。5 个子 SVR 模型可以并行地进行训练, 则完成子 SVR 模型的训练和建立 STVSI-SVR 模型的总耗时小于 1 min。

经过测试, 得到各子 SVR 模型的性能如表 3 所示。

可见, 各子 SVR 模型计算的电网 STVSI 指标值与实际值的相对误差最大不超过 5%, 平均误差约为 1.5%。如果 STVSI-SVR 模型计算出的 STVSI 值为 0.95, 则基本能断定电网实际上也满足暂态电压稳定判据。本算例中, 把图 4 所示的计算流程中的 $STVSI$ 取值为 1。

表 3 各子 SVR 模型的测试性能

Table 3 Test performance of each sub-SVR model

性能指标/ SVR 序号	1	2	3	4	5
最大相对误差	4.97%	4.99%	4.85%	4.37%	4.04%
最小相对误差	0.00%	0.04%	0.17%	0.07%	0.11%
平均相对误差	1.74%	1.47%	1.51%	1.47%	1.36%

接下来对该直流近区某一天中各时刻的动态无功需求量进行评估。该直流近区在这一天内的负荷曲线如图 7 所示, 包含 289 个数据点, 数据点的时间间隔是 5 min。

本文中, 认为数值仿真对电网暂态电压稳定的分析结果是准确的。参照图 4 所示的算法, 把用 STVSI-SVR 模型计算的部分用数值仿真代替, 认为这样算出的动态无功需求结果是实际值。相比之下, 把基于 STVSI-SVR 模型算出的结果认为是估计值。

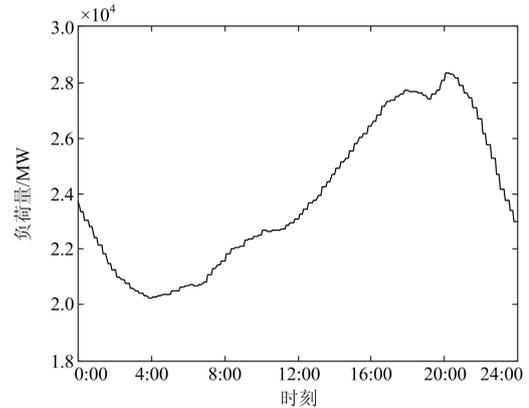


图 7 直流近区某一天的负荷曲线

Fig. 7 Load curve of a day in the DC near area

经过测试, 该直流近区某一天中各时刻的动态无功需求的实际值和估计值的结果如图 8 和表 4 所示。

由图 8 可见, 动态无功需求的估计值总体上接近于实际值, 因此计算出的动态无功需求可靠性较高。由表 4 可得, 动态无功需求的估计值与实际值的最大相对差异约为 5.57%, 最小相对差异约为 0%, 平均相对差异约为 1.52%。即动态无功需求的评估结果平均的误差只有不到 2%, 最大误差不超过 6%。经过测试, 每次动态无功需求评估耗时约 10~30 s, 远小于 5 min, 满足在线应用的需求。

表 4 动态无功储备需求估计值差异的统计

Table 4 Deviation of estimated value of dynamic VAR demand

最大相对差异	最小相对差异	平均相对差异	相对差异的标准差
5.57%	0%	1.52%	0.019 3

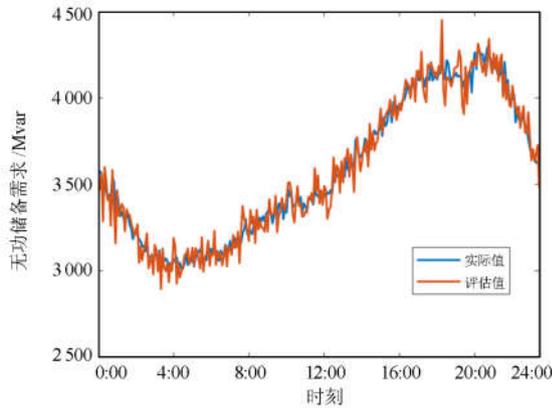


图 8 动态无功需求的实际值和估计值的对比

Fig. 8 Comparison of actual and estimated values of dynamic VAR demand

作为对比, 本文也基于时域仿真法计算了上述直流近区电网的动态无功需求。结果表明, 时域仿真法做动态无功需求评估耗时通常约为 2~5 h, 不能满足在线应用的需求。

综上所述, 本文提出的算法能够在离线时有效地更新 STVSI-SVR 模型, 在在线时快速地得出合理的动态无功评估结果, 能够实现在线应用。

6 结论

本文基于 SVR 提出了在线评估电网动态无功需求的方法。该方法可分成离线和在线两个部分: 离线部分用于生成样本库、选择关键特征和训练 STVSI-SVR 模型; 在线部分用于评估电网动态无功需求。离线部分和在线部分都周期性地执行, 以得出适应电网运行状态改变的评估结果。

传统的电网动态无功需求评估算法通常依赖数值仿真, 以评估电网的暂态电压稳定性、无功设备对电网暂态电压稳定的作用等。数值仿真的缺点是耗时长, 对包含数千个母线的电网做一次动态无功需求评估需要花费数小时到数十小时, 难以应用于在线。

为了快速地评估电网动态无功需求, 本文建立了 STVSI-SVR 模型来计算 STVSI 指标, 以代替数值仿真。基于 STVSI-SVR 模型, 提出了评估电网动态无功需求的算法, 并进一步提出了在线评估电网动态无功需求的算法。大量测试结果表明, 该算法可在 40 min 内完成一次 STVSI-SVR 模型的更新, 在 1 min 内完成一次动态无功需求评估, 满足在线应用的需求。

在实际应用中, 本文提出的动态无功需求评估方法能够应用到电网能量管理系统(EMS)的自动电

压控制(AVC)中, 降低电网暂态电压失稳的风险, 确保电网安全稳定的运行。

参考文献

- [1] 杨堤, 程浩忠, 姚良忠. 多端直流输电接入下的交直流混联系统电压稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2201-2209.
YANG Di, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong. Review of voltage stability study of AC/DC hybrid system with multi-terminal HVDC transmission[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2201-2209.
- [2] 李新年, 李涛, 刘耀, 等. 华东多直流馈入系统换相失败仿真研究[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 77-83.
LI Xinxin, LI Tao, LIU Yao, et al. Simulation study on commutation failure of east China multi-DC feeding system[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 77-83.
- [3] 王晶. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 141-146.
WANG Jing. Case analysis and simulation calculation of multi-feed DC current commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 141-146.
- [4] 李国栋, 皮俊波, 郑力. ± 500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 877-881.
LI Guodong, PI Junbo, ZHENG Li. Simulation analysis of ± 500 kV Linfeng DC bipolar blocking fault case[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 877-881.
- [5] 朱益华, 郭琦, 李威. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei. Research on safety and stability characteristics and control strategy of power grid with flexible HVDC transmission system[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.
- [6] 陈本阳, 元一平, 乌鹏涛. 基于在线稳定分析的电网调控运行安全风险管控策略[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 65-71.
CHEN Benyang, YUAN Yiping, WU Pengtao. Management risk management and control strategy for power grid regulation based on online stability analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2): 65-71.
- [7] 朱益华, 郭琦, 李威. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei. Study on power grid security and stability characteristics and control strategy of flexible HVDC transmission system[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.

- [8] 徐鹏, 赵成勇, 曹雅榕. 一种典型混联直流输电系统的运行特性分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 154-160.
XU Peng, ZHAO Chengyong, CAO Yarong. Analysis of operation characteristics of a typical hybrid HVDC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 154-160.
- [9] 周前, 张潮, 张宇宇, 等. 2018年多直流馈入江苏规划电网连锁换相失败分析[J]. 电力工程技术, 2018(1): 51-57.
ZHOU Qian, ZHANG Chao, ZHANG Ningyu, et al. Analysis of the failure of multi-DC feeding into Jiangsu planning grid interlocking in 2018[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018(1): 51-57.
- [10] 刘旺, 陈益峰, 朱添安, 等. 交直流电网的无功补偿选点及容量优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 91-97.
LIU Wang, CHEN Yifeng, ZHU Tianan, et al. Study on location and capacity optimization of reactive power compensation in AC-DC grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 91-97.
- [11] 马雷鹏, 韦钢, 李沁愉, 等. 考虑直流输电的电力系统无功备用优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 146-151.
MA Leipeng, WEI Gang, LI Qinyu, et al. Optimal reactive power reserve dispatch method considering DC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 146-151.
- [12] 李兴, 杨智斌, 颜远, 等. 考虑换流站损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 119-125.
LI Xing, YANG Zhibin, YAN Yuan, et al. Multi-objective reactive power optimal control of AC-DC systems including power loss characteristics of converter stations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 119-125.
- [13] 马兆兴, 陈昊, 万秋兰. 计及STATCOM容量约束的电压失稳性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 88-93.
MA Zhaoxing, CHEN Wei, WAN Qiulan. Analysis of voltage instability considering STATCOM capacity constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 88-93.
- [14] 熊虎岗, 程浩忠, 徐敬友. 考虑提高系统无功备用容量的无功优化调度[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 36-40.
XIONG Hugang, CHENG Haozhong, XU Jingyou. Reactive power optimization scheduling with consideration of improving system reactive power capacity[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 36-40.
- [15] 孙全才, 程浩忠, 张健. 提高暂态电压安全水平的动态无功备用优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2718-2725.
SUN Quancai, CHENG Haozhong, ZHANG Jian. Dynamic reactive power optimization method for improving transient voltage safety level[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2718-2725.
- [16] Real-time stability in power systems: techniques for early detection of the risk of blackout[M]. Springer, 2014.
- [17] 南方电网安全稳定计算分析导则: Q/CSG 11004—2009[S].
Guidelines for safety and stability calculation and analysis of China Southern Power Grid: Q/CSG 11004—2009[S].
- [18] NERC planning standards[EB/OL]. <http://www.nerc.com>.
- [19] TVA: 'TVA 2003 transient stability planning criteria'[EB/OL]. [2003]. <https://www.tva.gov/>.
- [20] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [21] 周艳真, 吴俊勇, 于之虹, 等. 用于电力系统暂态稳定预测的支持向量机组组合分类器及其可信度评价[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1188-1196.
ZHOU Yanzhen, WU Junyong, YU Zhihong, et al. Support vector machine ensemble classifier and its confidence evaluation for transient stability prediction of power systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1188-1196.
- [22] BATTITI R. Using mutual information for selecting features in supervised neural net learning[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(4): 537-550.
- [23] 国家电网安全稳定计算技术规范: Q/GDW 404—2010[S].
Security and stability calculation technical specification of State Grid Corporation of China: Q/GDW 404—2010[S].

收稿日期: 2018-07-27; 修回日期: 2019-01-24

作者简介:

刘俊磊(1985—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与无功电压控制。E-mail: 18802000394@163.com

(编辑 葛艳娜)