

基于超球支持向量机的主动配电网 经济运行评价模型

马丽叶¹, 高会芳², 朱 韬¹, 卢志刚¹

(1. 河北省电力电子节能与传动控制重点实验室(燕山大学), 秦皇岛 066004; 2. 河南省商丘工学院, 商丘 476000)

摘 要: 针对主动配电网的经济运行问题,建立一种新的评价指标体系,并提出一种基于超球支持向量机的主动配电网(ADN)经济运行评价模型。首先,定义 ADN 贡献电网损耗率、ADN 贡献调峰效率等指标,建立主动配电网经济运行的评价指标体系。其次,为避免高维指标体系的冗余特征,通过构建系统差距指数和系统协调指数对评价指标体系进行降维处理,并利用改进的超球支持向量机确定与各等级超球面的位置关系,最终确定主动配电网经济运行评价等级。最后,运用所提评价方法进行算例仿真,并将该方法与模糊综合评价方法进行对比分析,验证该方法的合理性和有效性。

关键词: 主动配电网; 经济运行评价; 指标体系; 超球支持向量机

中图分类号: TM73

文献标识码: A

0 引 言

近年来,随着分布式发电、储能系统、可控负荷等分布式能源的渗透率日益提高,传统配电网在运行灵活性、安全性、经济性等方面面临较大挑战,因此主动配电网应运而生^[1,2]。2008 年国际大电网会议(CIGRE)C6.11 项目组提出主动配电网(active distribution networks, ADN)的概念^[3,4]。主动配电网作为一个更加复杂的电力系统网络,对其经济运行进行评价不仅是节能降耗及指导改造和规划的重要保证,也对协调管理分布式能源起到较好的指导作用^[5,6],因此对其经济运行评价的研究具有非常重要的理论价值和实际意义。

目前国内外关于主动配电网经济运行评价的研究主要集中在电源规划^[7]、无功优化^[8]等方面。文献[9]提出一种考虑分布式电源减排指标的主动配电网低碳优化目标函数模型,并利用该模型对电源进行规划。文献[10]提出一种基于模型预测控制理论的主动配电网电压调节控制策略。文献[11]提出一种基于机会约束规划的主动配电网分布式风光双层随机最优潮流优化配置模型。

目前已有多种评价方法被广泛应用于电网运行评价中,主要有层次分析法、灰色关联度法、BP 神经网络法、模糊综合评价法等。近期的评价方法多是以以上几种方法的组合或改进^[12],这使得计算过程过于繁杂且计算量大,影响计算速度,在实际应用中受到限制。

针对以上问题,本文将分类与评价等级相结合,构建基于改进超球向量机的主动配电网经济运行评价模型。首先,大规模分布式能源接入主动配电网会对电网运行诸多方面产生较大影响^[13],基于此背景定义 ADN 贡献电网损耗率、ADN 贡献调峰效率等 6 个新指标,同时对部分已有指标进行改进^[14],构建主动配电网经济运行评价指标体系。接着,针对高维数据的特征空间存在冗余特征等问题,对指标体系进行降维处理。然后,利用超球支持向量机建立各等级下的最小超球模型,利用球心和半径确定各等级的超球面。此外,由各等级的判决函数确定待评价样本与各等级最小包围超球的位置关系,根据位置关系确定待评价样本的评价等级。最后,进行实例仿真并与已有方法进行对比,验证该方法的有效性。

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61304183; 61374098); 河北省自然科学基金(E2013203113)

通信作者: 马丽叶(1980—), 女, 博士、副教授, 主要从事电力系统运行分析与评价方面的研究。maliye@ysu.edu.cn

1 主动配电网评价指标体系

1.1 分布式能源并网经济特性指标定义

分布式能源(distributed energy resource, DER)大规模接入配电网后,与传统配电网的“网-荷”二元结构不同,ADN是“源-网-荷”的三元结构^[15]。ADN能“主动”对DER的性能进行分析和预测,尽可能消除对电网带来的影响^[16,17],并实现DER的高效率利用。

1.1.1 ADN贡献电网损耗率

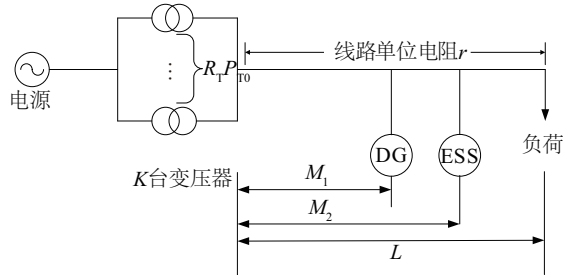
大规模DER接入主动配电网后,使得潮流变为双向,在ADN的主动管理下系统潮流得到改善,从而引起电网损耗发生变化。本文给出ADN贡献电网损耗率的定义如定义1。

定义1:ADN贡献电网损耗率为分布式能源并网引起的电网损耗减少量与并网前电网总损耗之比,计算式为:

$$\delta = \Delta P_{\text{ADN}} / P_0 \quad (1)$$

式中, ΔP_{ADN} ——分布式能源并网引起的网损减少量, MW; P_0 ——分布式能源并网前的电网总损耗, MW。

电网损耗主要包括线路损耗和变压器损耗, ΔP_{ADN} 主要是指分布式能源并网后引起的这两部分损耗的减少量。本文以DG和ESS接入配电网为例,对式(1)进行推导,模型如图1所示(由于篇幅限制仅给出并网后模型图)。



图中, M_1 、 M_2 、 L 单位为 km

图1 DG和ESS并网后模型图

Fig. 1 Grid-connected model of DG and ESS

并网前,总损耗 P_0 为线路有功损耗 P_{l0} 和变压器损耗 P_{T0} 之和^[18],可表示为:

$$P_0 = P_{l0} + P_{T0} = \frac{(rL + KR_T)(P_L^2 + Q_L^2)}{3U^2} \quad (2)$$

式中, r ——单位长度配电线路电阻值, Ω/km ;

R_T ——变压器阻抗, Ω ; P_L 和 Q_L ——负荷的有功和无功功率; U ——线路的电压, V。

仅DG并网后,由文献[18]可得贡献网损的减少量 ΔP_{DG} 为:

$$\Delta P_{\text{DG}} = \frac{(KR_T + rM_1)}{3U^2} (2P_L P_{\text{DG}} + 2Q_L Q_{\text{DG}} - P_{\text{DG}}^2 - Q_{\text{DG}}^2) \quad (3)$$

式中, P_{DG} ——并网DG的有功功率; Q_{DG} ——并网DG的无功功率。

仅ESS并网后,由于ESS的本身特性,本文推导其贡献网损的减少量 ΔP_{ESS} 的计算式为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ESS}} &= (KR_T + rM_2) \frac{P_L^2 - [P_L - (P_{\text{ESS}}^+ - P_{\text{ESS}}^-)]^2}{3U^2} \\ &= (KR_T + rM_2) \frac{[2P_L(P_{\text{ESS}}^+ - P_{\text{ESS}}^-) - (P_{\text{ESS}}^+ - P_{\text{ESS}}^-)^2]}{3U^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, P_{ESS}^+ ——ESS的放电功率; P_{ESS}^- ——ESS的充电功率,一个时刻只能工作在其中一种状态。

本文由式(1)推导DG和ESS一起并网后的ADN贡献电网损耗率 δ 的计算式如式(5)所示, δ 越大说明运行经济性越好, δ 越小则运行经济性越差。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\Delta P_{\text{ADN}}}{P_0} = \frac{\Delta P_{\text{DG}} + \Delta P_{\text{ESS}}}{P_0} = \frac{\Delta P_{\text{DG}}}{P_0} + \frac{\Delta P_{\text{ESS}}}{P_0} \\ &= \frac{(KR_T + rM_1) \cdot (2P_L P_{\text{DG}} + 2Q_L Q_{\text{DG}} - P_{\text{DG}}^2 - Q_{\text{DG}}^2)}{(rL + KR_T)(P_L^2 + Q_L^2)} + \\ &\quad \frac{[2P_L(P_{\text{ESS}}^+ - P_{\text{ESS}}^-) - (P_{\text{ESS}}^+ - P_{\text{ESS}}^-)^2] \cdot (KR_T + rM_2)}{(rL + KR_T)(P_L^2 + Q_L^2)} \end{aligned} \quad (5)$$

1.1.2 ADN贡献调峰效率

目前我国电力需求增长快,供电压力大,因此调峰成为配电网的一大难题。大规模分布式能源接入ADN起到较好的调峰作用,可改善系统潮流、缓解供电压力,因此调峰效率越好,系统运行越经济。本文给出ADN贡献调峰效率的定义如定义2。

定义2:ADN贡献调峰效率为负荷峰值时分布式发电、储能系统及可控负荷接入ADN的并网功率与负荷峰值之比:

$$\xi = \frac{P_{\text{DG}} + P_{\text{ESS}}^+ + P_{\text{CL}}}{P_{\text{max}}} \quad (6)$$

式中, P_{DG} ——分布式电源在负荷峰值时的并网功

率, MW; P_{ESS}^+ ——储能系统在负荷峰值时的放电功率, MW; P_{CL} ——在负荷峰值时切断的可控负荷功率, MW; P_{max} ——负荷峰值(日最大负荷), MW。

ADN 贡献调峰效能直观地反映出 ADN 协调管理分布式能源并网对调峰的影响, 调峰能提高配电网设备的利用效率, 也能使配电网更经济的运行。

1.1.3 ADN 可控负荷率

ADN 通过需求侧响应等策略使更多的负荷变为可控, 可控负荷越多网络结构越灵活, 对削峰填谷和降损的影响也越大。本文给出 ADN 可控负荷率的定义如定义 3。

定义 3: ADN 可控负荷率为可控负荷与日平均负荷之比:

$$K_{\text{CL}} = \frac{P_{\text{CL}}}{P_{\text{av}}} \quad (7)$$

$$P_{\text{av}} = \frac{\int_0^{24} P(t) dt}{24} \quad (8)$$

式中, P_{CL} ——可控负荷(一般通过协议求得), MW; P_{av} ——日平均负荷, MW; $P(t)$ —— t 时刻的负荷, MW。

ADN 可控负荷率越大, 说明 ADN 对负荷的控制和管理越好, 也更有助于配电网的经济运行。

1.1.4 ADN 延缓投资率

DER 在消纳过程中能起到较好的削峰作用, 避免因高峰负荷而追加的配电设备扩建容量的费用, 相当于获得延缓投资时间所产生的收益。基于此, 本文给出 ADN 延缓投资率的定义如定义 4。

定义 4: ADN 延缓投资率为年延缓配电网投资收益与年电网设备投资费用之比:

$$\tau = \frac{C_{\text{cap}}}{C_{\text{equ}}} \quad (9)$$

$$C_{\text{cap}} = c_d P_{\text{Nmax}} \quad (10)$$

$$C_{\text{equ}} = c_d P_{\text{equ}} \quad (11)$$

式中, C_{cap} ——年延缓配电网投资收益, 万元; C_{equ} ——年电网设备投资费用, 万元; c_d ——配电设备的单位功率造价, 万元/兆瓦; P_{Nmax} ——分布式能源年消纳的最大功率, MW; P_{equ} ——年电网设备投资功率, MW。

1.1.5 ADN 渗透率

分布式能源渗透率包含分布式能源静态渗透率 λ_{it} 和分布式能源有效渗透率 λ_{vx} 这 2 种类型^[16], 计算公式如式:

$$\lambda_{\text{it}} = \frac{P_{\text{ADN}}}{P_{\text{L}}^{\text{max}}} \quad (12)$$

$$\lambda_{\text{vx}} = \frac{P_{\text{ADN}}^*}{P_{\text{L}}} \quad (13)$$

式中, P_{ADN} ——分布式能源的额定功率, MW; $P_{\text{L}}^{\text{max}}$ ——配网最大负荷功率, MW; P_{ADN}^* ——分布式能源的实际出力, MW; P_{L} ——配网实际负荷值, MW。

基于分布式能源渗透率的定义, 本文给出 ADN 渗透率的定义如式(5)。

定义 5: ADN 渗透率为分布式能源静态渗透率 λ_{it} 和分布式能源有效渗透率 λ_{vx} 加权之和:

$$\begin{aligned} \lambda &= \omega_{\lambda} \lambda_{\text{it}} + (1 - \omega_{\lambda}) \lambda_{\text{vx}} \\ &= \omega_{\lambda} \frac{P_{\text{ADN}}}{P_{\text{L}}^{\text{max}}} + (1 - \omega_{\lambda}) \frac{P_{\text{ADN}}^*}{P_{\text{L}}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, ω_{λ} ——权重, 本文取值为 0.5。

ADN 渗透率反映了大规模分布式能源并网对主动配电网的影响程度。

1.1.6 ADN 消纳率

定义 6: ADN 消纳率是指主动配电网运行期间分布式能源的实际出力与最大允许出力之比:

$$\theta = \frac{P_{\text{ADN}}^*}{P_{\text{ADN}}^{\text{max}}} \quad (15)$$

式中, $P_{\text{ADN}}^{\text{max}}$ ——实际环境下分布式能源的最大允许出力, MW。

ADN 消纳率反映主动配电网对分布式能源的利用率, 体现主动配电网的兼容性及经济性, 消纳率越高主动配电网越经济运行。

1.2 主动配电网经济运行评价指标体系

目前关于配电网经济运行评价的指标多局限于传统配电网运行的几个方面, 缺乏对大规模分布式能源接入主动配电网的影响分析。因此, 本文基于上述定义的 6 个评价指标, 再结合文献[14], 并遵循系统性、科学性、客观性和实用性的原则建立递阶层次型主动配电网经济运行评价指标体系, 如表 1 所示。

表1 主动配电网经济运行评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of economic operation of active distribution network

一级指标	二级指标
电压质量 X_1	线路最大电压降落 X_{11}
	母线电压合格率 X_{12}
电网损耗 X_2	线路理论损耗率 X_{21}
	配变理论损耗率合格率 X_{22}
负荷 X_3	功率因数 X_{31}
	线路最佳负荷区域 X_{32}
	线路负荷率 X_{33}
配网设备 X_4	配变负载率合格率 X_{41}
	线路导线截面积合格率 X_{42}
	高耗能变压器占比 X_{43}
电网布局 X_5	供电半径 X_{51}
	容载比 X_{52}
	运行方式 X_{53}
	导线变压器匹配度 X_{54}
并网经济特性 X_6	ADN 贡献电网损耗率 X_{61}
	ADN 贡献调峰效率 X_{62}
	ADN 可控负荷率 X_{63}
	ADN 延缓投资率 X_{64}
	ADN 渗透率 X_{65}
	ADN 消纳率 X_{66}

1.3 主动配电网对已有指标的影响分析

大规模分布式能源并网使 ADN 系统结构、潮流发生改变,从而需对部分已有指标的计算进行改进。本文以二级指标线路最大电压降落 X_{11} 为例介绍主动配电网接入分布式能源之后的计算方法,其他需要改进的指标计算方法类似。线路最大电压降落 ΔU ,计算方法与文献[14]所述类似,不过需要加入由于分布式能源引起的电压变化量:

$$\Delta U = U_1 - U_2 + \Delta U_{\text{ADN}} \quad (16)$$

式中, U_1 、 U_2 ——线路的首、末端电压, kV; ΔU_{ADN} ——主动配电网加入分布式能源引起的电压变化量, kV。

在 1.2 节建立指标体系的基础上,需改进计算的二级指标包括 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{21} 、 X_{22} 、 X_{31} 、 X_{33} 、 X_{41} 、 X_{52} 、 X_{53} 。

2 指标体系降维模型

评价指标体系包含多个影响因素,这里将每个指标(因素)看成系统的一维,所有指标(因素)一起构成一个多维空间^[19],从而将经济运行评价按评价指标的数量映射到多维空间进行模型评估,并进一步给出多维空间中几何位置的描述,如图 2 所示。

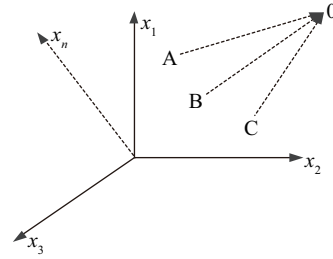


图2 多维空间中评价指标体系几何位置示意图

Fig. 2 Diagram of geometric position of evaluation index system in multidimensional space

图 2 中, x_1, x_2, \dots, x_n 分别为经济运行评价指标系统的 n 个维(指标); O 为系统的最优状态; A 、 B 、 C 分别为系统发展中的不同状态。当指标数量较多时,映射形成的高维数据的特征空间中通常含有许多冗余特征,这些冗余特征增加了学习、训练的时间及空间复杂度,降低了分析处理的精度。因此,本文通过构建系统差距指数和系统协调指数来降低评价指标的维数,对经济运行评价指标体系进行修正。现以表 1 中 3 层结构的经济运行评价指标体系为例,构建模型如下。

模型中用差距指数来刻画现状与发展目标之间差距的状态参量,差距指数包括二级指标差距指数、一级指标差距指数和系统差距指数。二级指标差距指数可根据各评价指标的发展基准、现状和目标之间的相关关系确定。一级指标差距指数根据二级指标差距指数经加权求和得到,即由式(17)确定:

$$d_i = \sum_{j=1}^{k_i} d_i^j \cdot \omega_i^j, \quad i=1,2,\dots,m \quad (17)$$

式中, k_i ——第 i 个一级指标下包含的二级指标数量; d_i ——第 i 个一级指标的差距指数, $0 \leq d_i \leq 1$, d_i 越小,表示该一级指标的发展差距越小; d_i 越大,表示该一级指标的发展差距越大; ω_i^j ——第 i 个一级指标下第 j 个二级指标的权重。

同理,系统差距指数由一级差距指数经加权求和确定。模型中用协调指数来反映各一级指标、各二级指标之间保持的协调性,强调它们之间的协调发展。协调指数包括一级指标协调指数和系统协调指数。协调指数计算为:

$$H = \frac{1}{\sum_{s=1}^{p-1} (p-s)} \sum_{s=1}^{p-1} \sum_{t=s+1}^p K(s,t) \quad (18)$$

$$K(s,t) = \begin{cases} 1, & d(s) = d(t) \\ 1 - d(t), & d(s) = 0, d(t) \neq 0 \\ 1 - d(s), & d(s) \neq 0, d(t) = 0 \\ \left[\frac{4 \times d(s) \times d(t)}{[d(s) + d(t)]^2} \right]^2, & d(s) \neq d(t), \text{ 且} \\ & d(s) \neq 0, d(t) \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中, H —— 系统或各一级指标协调指数, $0 \leq H \leq 1$, H 越大,表示各一级指标或各二级指标间协调性越好; H 越小,表示各一级指标或各二级指标间协调性越差; p —— 一级指标或各二级指标的总数量; $d(s)$ 、 $d(t)$ —— 第 s 、 t 个一级指标或二级指标的差距指数。

3 改进的超球支持向量机评价模型

3.1 超球支持向量机模型

考虑到一般性,在线性不可分的情况下,把非线性的样本转换到高维空间,在高维空间中运用超球支持向量机^[20,21]。超球多类支持向量机是将多类数据中的每类在高维空间中用超球来界定的一种多分类器。首先给定 m 个 n 维空间的训练样本集合 $A^k (k=1, \dots, m)$, $A^k = \{x_i^k | x_i^k \in R^n, i=1, 2, \dots, l\}$ 。对于每个集合,寻找一个最小超球,该超球基本将集合内样本点包围,设 R_k 为超球的半径, a_k 为超球的球心。根据样本数据的奇异值引入松弛变量 ξ_i ,加入正比于违反约束的惩罚 C ,通过非线性映射将训练数据 x_i^k 映射到一个高维的特征空间进行支持向量域描述训练,即转化为求解如下凸二次规划的问题:

$$\min F(R_k, a_k, \xi_i) = R_k^2 + C \sum_{i=1}^l \xi_i \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & (\varphi(x_i^k) - a_k)(\varphi(x_i^k) - a_k)^T \leq R_k^2 + \xi_i \quad (i=1, \dots, l) \\ & 0 \leq \xi_i \quad (i=1, \dots, l) \end{aligned} \quad (21)$$

式中, φ —— 非线性映射, $\varphi: x \rightarrow \varphi(x)$, 它将低维

原始空间的数据映射为高维非线性空间的数据。为了不必知道非线性映射 $\varphi: x \rightarrow \varphi(x)$ 的具体形式和高维空间的维数,通过引入核函数 $K(x_i^k, x_j^k) = \varphi(x_i^k)^T \varphi(x_j^k)$,将内积运算用原空间的函数来实现。同时结合拉格朗日乘子法,可得到上述规划的对偶规划,并求得最优解。

$$\begin{aligned} \max & \sum_{i=1}^l \alpha_i^k K(x_i^k, x_i^k) - \sum_{i,j=1}^l \alpha_i^k \alpha_j^k K(x_i^k, x_j^k) \\ \text{s.t. } & \sum_{i=1}^l \alpha_i^k = 1, \quad 0 \leq \alpha_i^k \leq C \end{aligned} \quad (22)$$

记最优解 $\alpha^{k*} = (\alpha_1^{k*}, \alpha_2^{k*}, \dots, \alpha_l^{k*})$, 称对应 $\alpha_i^{k*} > 0$ 的样本为支持向量;称其余的样本为非支持向量。记支持向量集合为 SV, 则最小超球的球心和半径为:

$$a_k = \sum_{i=1}^l \alpha_i^k \varphi(x_i^k) \quad (23)$$

$$R_k = 1/n_{SV} \left(\sum_{i \in SV} \|\varphi(x_i^k) - a_k\| \right) \quad (24)$$

假设待评价样本点为 x , 则最终的判决函数为:

$$\begin{aligned} f_k(x) = \text{sgn} & \left(R_k^2 - \sum_{i,j=1}^l \alpha_i^k \alpha_j^k K(x_i^k, x_j^k) + \right. \\ & \left. 2 \sum_{i=1}^l \alpha_i^k K(x_i^k, x) - K(x, x) \right) \end{aligned} \quad (25)$$

3.2 基于改进超球支持向量机的主动配电网经济运行评价模型

3.2.1 主动配电网经济运行评价各等级超球模型

首先基于降维之后评价指标数量 n , 对于 m 个等级问题, 给定 m 个 n 维空间的训练样本集合 $A^k (k=1, \dots, m)$, $A^k = \{x_i^k | x_i^k \in R^n, i=1, 2, \dots, l\}$ 。在 3.1 节基础上, 对于每一个集合, 寻找一个最小超球, 该超球基本将集合内样本点包围, 由 3.1 节可知超球的半径 R_k , 超球的球心 a_k 。

由于无法求解非线性映射 $\varphi(x)$, 所以求解超球的球心不能直接按照式(23)求解, 而应先求球心的平方, 计算公式如式(26):

$$a_k^2 = \sum_{i,j=1}^l \alpha_i^k \alpha_j^k K(x_i^k, x_j^k) \quad (26)$$

求解半径也不能直接按照式(24)求解, 而应按照计算公式先求解半径的平方再求解半径。

$$R_k^2 = \|\varphi(x) - a_k\|^2$$

$$= K(x, x) - 2 \sum_{i=1}^l \alpha_i^k K(x, x_i^k) + \sum_{i=1, j=1}^l \alpha_i^k \alpha_j^k K(x_i^k, x_j^k) \quad (27)$$

$$R_k = \sqrt{R_k^2} \quad (28)$$

上述核函数可有多种选择,目前常用的核函数主要有线性核函数、多项式核函数、双曲正切核函数及高斯径向基核函数(RBF)。超球向量机的相关研究表明,选取不同的核函数对其性能的影响不是很大,本文选用高斯径向基核函数,公式如式(29):

$$K(x_i^k, x_j^k) = \exp\left[-\|x_i^k - x_j^k\|^2 / (2\sigma^2)\right] \quad (29)$$

式中, σ ——核参数。

计算求得 m 个等级下最小包围超球的球心和半径,进而确定各等级最小超球面。

3.2.2 重叠区域改进超球支持向量机模型

在理想情况下,任意 2 个超球都是相互独立的,待测样本都能被正确分类,但实际上有时超球之间是相互重叠的,位于重叠区域的样本点不能再按照 3.1 节的决策函数分类。本文以二维超球重叠为例进行说明,如图 3 所示, S_1 和 S_2 分别代表 2 个分类等级。为了提高超球重叠时的分类精度,引入子超球支持向量机。首先将包含有重叠区域的最小超球(母超球)标识出来,然后求出同类错误样本点(与母超球类别相同)子超球和异类错误样本点(与母超球类别不同)子超球^[20]。

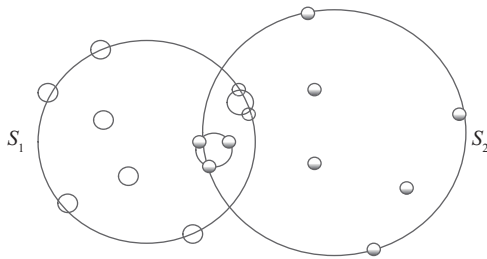


图3 二维超球重叠

Fig. 3 Two-dimensional hypersphere overlapping

本文首先基于文献[21]对核参数 σ 进行优化,根据最小超球间距使重叠区域尽可能最小,然后对最小化的重叠区域使用子超球支持向量机。本文将核参数优化与子超球支持向量机结合,最小化重叠区域,简化计算过程,并使结果更加精确。具体的核参数优化和子超球支持向量机训练步骤参见文献[20,21]。

3.2.3 主动配电网经济运行评价等级判定方法

首先判断待评价样本是否在超球重叠区域,如果不在重叠区则直接使用式(25)的判决函数即可;如果在重叠区则先建立两类错误样本点的子超球模型,然后使用判决函数判定待评价样本所属子超球。然后,根据判决函数:当 $f_k(x)=+1$ 时,则样本点 x 位于 k 等级最小超球内或子超球内;当 $f_k(x)=-1$ 时,则样本点 x 位于 k 等级最小超球外或子超球外;当 $f_k(x)=0$ 时,则样本点 x 位于 k 等级最小超球球面上或子超球球面上。因此,由各等级判决函数的结果最终确定待评价样本 x 的等级。基于超球支持向量机的主动配电网经济运行评价的系统框图如图 4 所示。

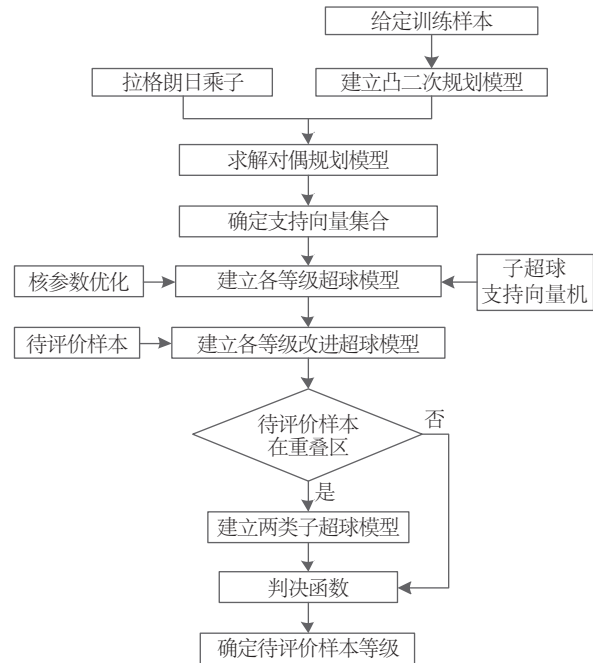


图4 基于超球支持向量机的主动配电网经济运行评价系统框图

Fig. 4 System block diagram of evaluation model for economic operation of ADN based on hypersphere SVM

4 仿真算例

本文以某地区实际运行的 2 个 10 kV 配电网为例建立经济运行评价模型。各指标原始数据来源于实际运行数据,计算各原始指标值见表 2。对指标体系降维处理之后,用超球支持向量机对算例进行经济运行评价。

表2 算例A、B的原始指标值

Table 2 Original index value of the case A and B

指标	A	B
X_{11}	0.64	0.52
X_{12}	0.70	0.88
X_{21}	0.40	0.35
X_{22}	0.85	0.82
X_{31}	0.86	0.90
X_{32}	2779.23	2832.70
X_{33}	0.80	0.89
X_{41}	0.81	0.78
X_{42}	0.78	0.70
X_{43}	0.47	0.20
X_{51}	17.7	13.40
X_{52}	1.88	2.03
X_{53}	313.78	277.13
X_{54}	0.62	0.82
X_{61}	10.24	16.37
X_{62}	0.26	0.44
X_{63}	0.37	0.58
X_{64}	0.42	0.48
X_{65}	0.56	0.64
X_{66}	0.78	0.85

对表2中的指标值用反归一化方法求解二级指标的差距指数,对于成本型指标,即越小越好型,计算公式如式(30)所示:

$$y = \begin{cases} 1, & x > x_G \\ \frac{x - x_N}{x_G - x_N}, & x_N \leq x \leq x_G \\ 0, & x < x_N \end{cases} \quad (30)$$

对于效益型指标,即越大越好型,计算公式如式(31)所示:

$$y = \begin{cases} 1, & x < x_N \\ \frac{x_G - x}{x_G - x_N}, & x_N \leq x \leq x_G \\ 0, & x > x_G \end{cases} \quad (31)$$

对于区间型指标,即值在某个区间内越好型,计算公式如式(32)所示:

$$y = \begin{cases} 1, & x > x_{N1} \text{ 或 } x < x_{N2} \\ \frac{2|x_G - x|}{x_{N1} + x_{N2}}, & x_{N2} \leq x \leq x_{N1} \end{cases} \quad (32)$$

式(30)~式(32)中的 x_G 为目标值, x_N 、 x_{N1} 、 x_{N2} 为基准值。在二级指标差距指数的基础上,利用式(17)~式(19)计算算例A、B的系统差距指数和系统协调指数如表3所示。

表3 算例A、B的降维指标值

Table 3 Index value of dimension reduction of case A and B

指标	A	B
系统差距指数	0.4425	0.2947
系统协调指数	0.6951	0.8074

由于系统差距指数是越小越好型,而系统协调指数是越大越好型,为了能将2个指标的类型保持一致,先对系统差距指数进行修正,修正系统差距指数为实数1与系统差距指数的差值,具体结果如表4所示。

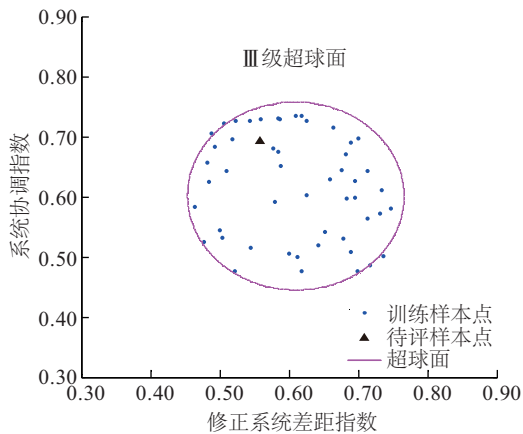
表4 算例A、B的修正降维指标值

Table 4 Index value of modified reduction dimension of case A and B

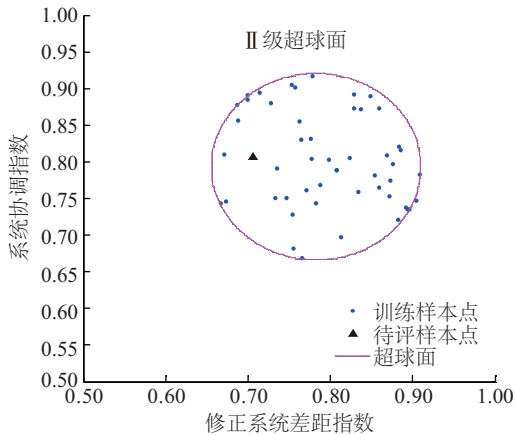
指标	A	B
修正系统差距指数	0.5575	0.7053
系统协调指数	0.6951	0.8074

本文拟采用5个分类等级{I、II、III、IV、V}即{优、良、中、一般、差}。利用超球支持向量机评价模型对算例A、B的修正系统差距指数和系统协调指数进行分类,确定经济运行评价等级,仿真分类图如图5a所示。图5a中圆点代表III级超球面训练样本点,三角代表算例A待评样本点,从待评样本点所处III级超球面位置得出算例A的经济运行等级为III级,即中。图5b中圆点代表II级超球面训练样本点,三角代表算例B待评样本点,从待评样本点所处II级超球面位置得出算例B的经济运行等级为II级,即良。

图6中圆点分别代表II级超球面和III级超球面训练样本点,三角分别代表待评价A、B样本点,图6为A、B样本点在不同分类等级的超球面图。从图6可看出待评样本点均不在超球重叠区内,因此直接采用式(25)的判决函数进行判定,判决函数



a. 算例 A



b. 算例 B

图5 算例A或B分类等级图

Fig. 5 Categorization of case A or B

结果如表 5 所示。从表 5 中可看出,A 处于Ⅲ级超球面内,B 处于Ⅱ级超球面内,结合上述的仿真图,最终得出 A 为Ⅲ级(即中),B 为Ⅱ级(即良),同时运用模糊综合评价方法对本文算例进行评估,评估结果与本文的评价结果对比如表 6 所示。由表 6 可知,本文评估结果与运用模糊综合评价方法得到的评估结果一致,从而验证本文提出的评估方法的有效性和合理性。

本文所提评估方法可评价主动配电网经济运行的现状,A 为Ⅲ级,B 为Ⅱ级,说明 B 的经济运行状况优于 A。从表 2 可看出,B 的整体指标状况优于 A,且 B 的修正系统差距指数与系统协调指数均优于 A,从而说明评价结果的合理性。通过与 B 对比可知,A 的二级指标 X_{12} 、 X_{33} 、 X_{43} 等的水平明显较低,因此可通过更换电压不合格的母线、提高线路负荷率及更换高耗能变压器等来优化 B 的经济运行状况。

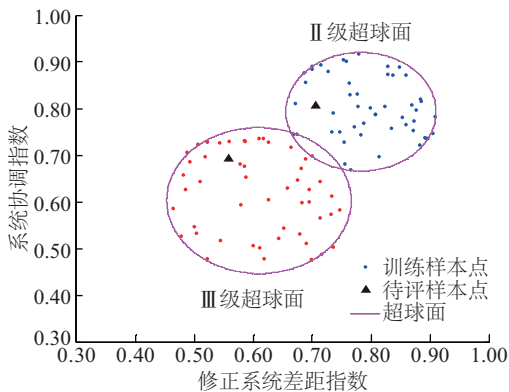


图6 算例A、B分类等级图

Fig. 6 Categorization of case A and B

表5 算例A、B的判决函数结果

Table 5 Calculation results of decision function of case A and B

判决函数	A	B
$f_1(x)$	-1	-1
$f_2(x)$	-1	+1
$f_3(x)$	+1	-1
$f_4(x)$	-1	-1
$f_5(x)$	-1	-1

表6 算例A、B的经济运行评价结果

Table 6 Evaluation results of economic operation of case A and B

评价结果	A	B
本文	Ⅲ	Ⅱ
模糊综合评价	Ⅲ	Ⅱ

5 结 论

基于大规模分布式能源接入主动配电网的背景下建立新的指标体系,对指标体系降维处理后,建立基于超球支持向量机的评价模型。首先在主动配电网的背景下定义 6 个指标,即 ADN 贡献电网损耗率指标、ADN 贡献调峰效度指标、ADN 可控负荷率指标、ADN 延缓投资率指标、ADN 渗透率指标及 ADN 消纳率指标,并结合传统评价指标体系构建主动配电网的评价指标体系;其次利用系统差距指数和系统协调指数对指标体系进行降维处理,减少指标体系的冗余性,提高评价结果的精确度;最后,采用超球支持向量机模型对主动配电网经济

运行进行评价,通过仿真图和仿真结果确定主动配电网的评价等级。该指标体系加入考虑分布式能源接入主动配电网影响的指标,更能客观真实地评价主动配电网经济运行。该评价模型计算简单,快速、客观、易于编程、适应性较强、模糊性较小、精确度较高,可为配电网经济运行的评估提供一种新的方法。

[参考文献]

- [1] 赵 波,王财胜,周金辉,等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125—135.
- [1] Zhao Bo, Wang Caisheng, Zhou Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125—135.
- [2] Al Kaabi S S, Zeineldin H H, Khadkikar V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 1—9.
- [3] 张建华,曾 博,张玉莹,等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13—23.
- [3] Zhang Jianhua, Zeng Bo, Zhang Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13—23.
- [4] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49—55.
- [4] Liu Chunfang. An integrated design method of active distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49—55.
- [5] Borges C L T, Martins V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distribute dgeneration uncertainties [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107—116.
- [6] 尤 毅,刘 东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10—16.
- [6] You Yi, Liu Dong, Yu Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10—16.
- [7] 潘 超,焦薇羽,孟 涛,等. 基于混合智能粒子群算法的广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69—75.
- [7] Pan Chao, Jiao Weiyu, Meng Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69—75.
- [8] 陈 旭,张勇军,黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143—151.
- [8] Chen Xu, Zhang Yongjun, Huang Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143—151.
- [9] 张 跃,杨汾艳,曾 杰,等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67—72.
- [9] Zhang Yue, Yang Fenyan, Zeng Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67—72.
- [10] 蔡 宇,林 今,宋永华,等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 42—49.
- [10] Cai Yu, Lin Jin, Song Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 42—49.
- [11] 马 瑞,金 艳,刘鸣春. 基于机会约束规划的主动配电网分布式风光双层优化配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 145—154.
- [11] Ma Rui, Jin Yan, Liu Mingchun. Bi-level optimal configuration of distributed wind and photovoltaic generations in active distribution network based on chance constrained programming [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 145—154.
- [12] 马丽叶,卢志刚,胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163—171.
- [12] Ma Liye, Lu Zhigang, Hu Huawei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number [J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2012, 27(8): 163—171.
- [13] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊1): 346—351.
- [13] Shen Xin, Cao Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(Sup1): 346—351.
- [14] 卢志刚, 马丽叶. 配电网经济运行评价指标体系的建立[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 108—112.
- [14] Lu Zhigang, Ma Liye. Establishment of evaluation index system for economic performance of distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 108—112.
- [15] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(22): 12—18.
- [15] Fan Mingtian, Zhang Zuping, Su Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(22): 12—18.
- [16] 钟清, 余南华, 尤毅, 等. 主动配电网技术特性及评估指标体系[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 122—127.
- [16] Zhong Qing, Yu Nanhua, You Yi, et al. Technical characteristics and evaluation index system of active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 122—127.
- [17] 颜志敏, 王承民, 郑健, 等. 配电网中蓄电池储能系统的价值评估模型[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 57—61.
- [17] Yan Zhimin, Wang Chengmin, Zheng Jian, et al. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 57—61.
- [18] 刘琳, 陶顺, 肖湘宁, 等. 分布式发电及其对配电网网损的影响分析[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(3): 16—19, 24.
- [18] Liu Lin, Tao Shun, Xiao Xiangning, et al. Distributed generation and its impact on network loss of power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(3): 16—19, 24.
- [19] 贺新春, 李兴拼, 刘卫林. 水资源系统多目标综合评估模型与方法[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1033—1039.
- [19] He Xinchun, Li Xingpin, Liu Weilin. Multi-objective comprehensive assessment model for water resources system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1033—1039.
- [20] 陈昱奇, 潘俊, 董健, 等. 基于超球支持向量机的水环境质量评价[J]. 供水技术, 2015, 9(2): 5—9.
- [20] Chen Yuqi, Pan Jun, Dong Jian, et al. Quality assessment of water environment based on the hypersphere support vector machine[J]. Water Technology, 2015, 9(2): 5—9.
- [21] 康守强, 王玉静, 姜义成, 等. 基于超球球心间距多类支持向量机的滚动轴承故障分类[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(14): 2319—2325.
- [21] Kang Shouqiang, Wang Yujing, Jiang Yicheng, et al. Fault classification of rolling bearing based on hypersphere spherical center distance multiclass support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(14): 2319—2325.

EVALUATION MODEL FOR ECONOMIC OPERATION OF ACTIVE DISTRIBUTION NETWORK BASED ON HYPER-SPHERE SUPPORT VECTOR MACHINE

Ma Liye¹, Gao Huifang², Zhu Tao¹, Lu Zhigang¹

(1. *Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province (Yanshan University), Qinhuangdao 066004, China*; 2. *Shangqiu Institute of Technology of Henan Province, Shangqiu 476000, China*)

Abstract: With the connection of large number of distributed energy resources (DERs) to power grid, the economic operation problems of active distribution network (ADN) have restricted its application. According to the economics of ADN operation, an innovative evaluation index system is proposed and an evaluation model for economic operation of ADN, which is based on hyper-sphere support vector machine is established in this paper. After defining, ADN contribution power loss rate, ADN contribution peak shaving validity etc. an evaluation index system is established for ADN economic operation. In order to avoid redundant features of high dimensional index, the system distance index and the coordination index are used for the dimensionality reduction of the evaluation index system. Besides, improved hyper-sphere support vector machine is used to determine the position relationship with all levels of hyper-sphere, and further to obtain the evaluation level of economic operation of ADN. Finally, some of example simulations and the comparison of the proposed evaluation method and the fuzzy comprehensive evaluation method is completed which verifies the validity and effectiveness of the proposed method.

Keywords: active distribution network; evaluation of economic operation; index system; hyper-sphere support vector machine