

转型发展形势下城市电网发展协调性评价

孙可¹, 裴传逊², 翁秉宇²

¹国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州

²国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波

Email: changtaiqs@vip.sina.com, sun_ke@zj.sgcc.com.cn, hnlxy2003@163.com, 279881908@qq.com

收稿日期: 2020年8月26日; 录用日期: 2020年9月9日; 发布日期: 2020年9月16日

摘要

目前, 在电网建设高质量发展的新阶段, 国网公司提出了转型发展的战略目标, 新形势要求城市电网发展与社会经济、能源环境等发展协调一致。本文在国内外相关研究成果基础上, 从电网与经济协调性、电网与新能源发电协调性、电网负荷容量协调性、电网层级协调性等方面, 建立评价指标体系和评价模型。最后, 以典型实例进行验证, 评价结果为新形势城市电网高质量协调发展提供决策支持。

关键词

转型发展, 电网发展, 协调性, 评价模型

Evaluation on the Coordination of Urban Power Grid Development under the Situation of Transitional Development

Ke Sun¹, Chuanxun Pei², Bingyu Weng²

¹State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²State Grid Zhejiang Ningbo Power Supply Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Email: changtaiqs@vip.sina.com, sun_ke@zj.sgcc.com.cn, hnlxy2003@163.com, 279881908@qq.com

Received: Aug. 26th, 2020; accepted: Sep. 9th, 2020; published: Sep. 16th, 2020

Abstract

At present, in the new stage of high-quality development of power grid construction, State Grid Corporation has proposed a strategic goal of transformational development. The new situation requires the development of urban power grids to be coordinated with the development of social

economy, energy and environment. Based on relevant research results at home and abroad, this paper establishes an evaluation index system and evaluation model from the aspects of grid and economic coordination, grid and new energy generation coordination, grid load capacity coordination, and grid level coordination. Finally, a typical example is used for verification, and the evaluation results provide decision support for the high-quality and coordinated development of urban power grids in the new situation.

Keywords

Transformational Development, Power Grid Development, Coordination, Evaluation Model

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,我国经济已经由高速增长阶段转向高质量发展阶段[1],电网建设也随之转换为高质量发展的新阶段,电力需求日益个性化、多样化、互动化,对电网建设质量提出了更高的要求。2020年国网公司提出全面开启建设“具有中国特色国际领先的能源互联网企业”的战略目标[2],2035年全面建成具有中国特色国际领先的能源互联网企业。

国内外关于电网评价的研究,主要分为两大类:单一指标评价[3][4][5]、综合评价体系[6][7][8]。单一指标评价主要立足于配电网的单一特性,例如供电可靠性、建设规模与经济性、电能质量等。综合评价体系是以上单一特性的整合,以达到地区电网横向、纵向分析、多规划方案比较和优选等目的。

国外在智能化电网发展的背景下,有IBM公司的智能电网五阶段成熟度模型、美国能源部的智能电网发展评价指标体系、欧洲的智能电网收益评估指标体系。在清洁能源规模化发展背景下,关于节能减排、清洁能源有效利用等方面,也提出了诸多的评价体系、模型和方法[9]。国内电网在评价、优化方面已取得长足进展,且很多成果处于国际领先水平。如世界一流城市电网评价指标体系、智能电网的评估、评价指标体系、大规模新能源发电并网后的电网安全可靠评价等[10][11][12]。

整体来说,完整的国外电网评价指标体系资料相对较少,单个评价指标、综合评价指标的研究和借鉴又存在局限性;国内电网在技术性、经济性、智能电网等角度对电网的发展较多评价,但电网发展协调性评价,指标选取不完善[13][14][15][16][17],评价方法未考虑区域之间的差异性,趋势性分析不强。在当前国家经济高质量发展阶段,国网公司新战略目标调整的转型新形式下,未发现基于转型发展的城市电网发展协调性评价。

本文主要从宏观经济、电网建设要求、国网公司转型目标等方面,分析了电网转型发展形势下投资面临的问题。在现有国内外相关研究成果基础上,构建电网协调性发展评价指标体系、评价模型。最后,以4个地区电网数据为典型实例进行验证,评价结果为新形势城市电网高质量协调发展提供决策和支持。

2. 电网发展协调性评价指标体系

2.1. 构建思路及指标体系

电网发展协调性评价是考察地区电网发展整体性、综合性、灵活性、健壮性、平衡性的重要手段,它不片面考虑单一系统或要素,而是从全局角度,综合考虑系统内各要素在既定目标下的均衡发展。

近年来,随着可再生能源的大规模并网发电,新能源与区域电网的协调性发展问题日益突出。其中,新能源发电环节的协调性是影响整个区域电网协调程度的基础性环节;电网按照电压等级,可以分为输电网和配电网,输配电网是实现资源统筹优化、满足新能源发电规模化发展的重要环节。

电网建设高质量发展新阶段,目标电网规划最基本的要求是安全可靠与经济运行,高质量满足差异化用电需求。即电网容量必须满足负荷发展,满足负荷在故障下的安全转供,同时保持可靠性与经济性的平衡,不同层级间电网的平衡协调,不致造成资金的浪费和设备的低效利用。

在以上分析基础上,本文按照整体性、全面性、差异性、可度量性的原则,在国内外电网单一评价和综合评价先进经验基础上,结合转型发展形势下社会经济和电网发展特点和要求,从电网与经济协调性、电网与新能源发电协调性、电网负荷容量协调性、电网层级协调性等方面,建立评价指标体系,如图1所示。

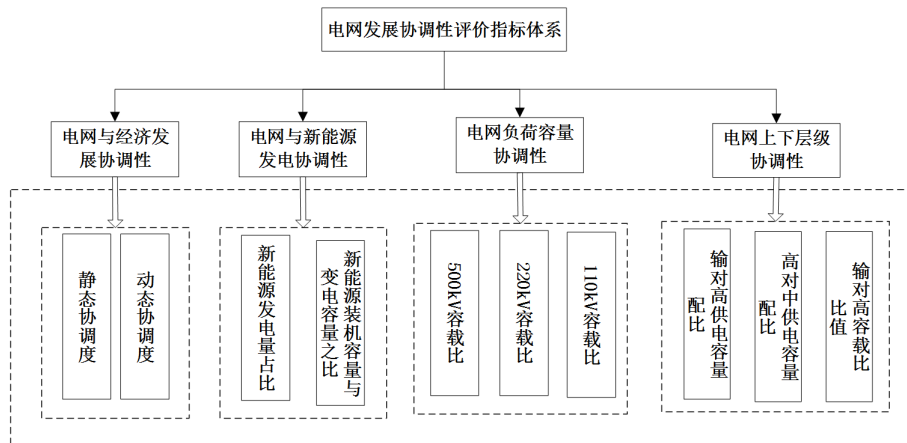


Figure 1. Evaluation index system for the coordination of power grid development
图 1. 电网发展协调性评价指标体系

2.2. 指标的计算方法

1、电网与经济发展协调性

引入综合协调度 D_i 来表征城市经济与电网的综合协调水平。两系统间的协调度可分为静态协调度和动态协调度。前者用来表征在某一时期两系统间的协调状况,后者用来表征两系统间的协调发展趋势。

1) 静态协调度

采用 $D_1(t)$ 、 $D_2(t)$ 两种指标方法来计算经济及电网系统间的静态协调度。具体公式如下。

$$D_1(t) = 1 - \frac{\left| f(y,t) - \frac{f(y,t) + f(x,t)}{2} \right| + \left| f(x,t) - \frac{f(y,t) + f(x,t)}{2} \right|}{\frac{f(y,t) + f(x,t)}{2}} \quad (式 1)$$

$$D_2(t) = \frac{f(y,t)}{f(x,t)} \quad (式 2)$$

式中, $f(y,t)$ 是电网指标对时间 t 发展的函数,指标主要为供电可靠率,综合电压合格率、全社会用电量、110 kV 变电容量,10 kV 线路长度,电网投资额等;

$f(x,t)$ 是电网指标对时间 t 发展的函数,指标主要为:GDP,人口,固定资产投资,人均可支配收入,社会消费品零售总额及财政收入等。

2) 动态协调度

静态协调度不能反映两系统间协调度的变化趋势及优化程度的快慢。

动态协调度可以弥补这一不足。 $D_3(t)$ 可解释为“累进协调度”，如式3所示。

$$D_3(t) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^t D_1(t-i) \quad (\text{式3})$$

式中， T 为评价的周期阶段， i 为评价时序。

2、电网与新能源发电协调性

1) 新能源发电量占比

$$\lambda_{GQ} = \frac{\sum Q_{Gi}}{Q} \quad (\text{式4})$$

式中： λ_{GQ} 表示新能源发电量与区域供电量的比值；

$\sum Q_{Gi}$ 表示*i*台新能源年发电量总和， $i=1,2,3,\dots$ ，单位 kWh；

Q 表示区域供电量，单位 kWh。

2) 新能源装机容量与变电容量之比

$$\lambda_{GS} = \frac{\sum S_{Gi}}{S} \quad (\text{式5})$$

式中： λ_{GS} 表示新能源建设规模与电网建设规模的比值；

$\sum Q_{Gi}$ 表示*i*台新能源年发电量总和， $i=1,2,3,\dots$ ，单位 kWh；

Q 表示区域供电量，单位 kWh。

3、电网负荷容量协调性

选用不同电压等级容载比(500, 220, 110 kV)，该指标整体上反映供电区域变电容量对负荷增长的匹配适应程度。

$$R_{si} = \frac{\sum S_i}{\sum P_i} \quad (\text{式6})$$

式中： R_{si} 表示第*i*电压等级的容载比， $i=500、220、110$ kV；

$\sum S_i$ 表示第*i*电压等级的总容量，单位 kVA；

$\sum P_i$ 表示第*i*电压等级的总负荷，单位 kW。

4、电网上下层级协调性

分不同电压层级(500, 220, 110, 10 kV)，评估区域内主变配变之间的变电容量比，包括输配电网变电容量比和高中压配电网变电容量比。

$$\lambda_{si} = \frac{\sum S_{up}}{\sum S_{down}} \times 100\% \quad (\text{式7})$$

式中： λ_{si} 表示第*i*电压等级的设备利用率， $i=220、110、10$ ；

$\sum S_{up}$ 表示第*i*电压等级的上级变电容量值，单位kVA；

$\sum S_{down}$ 表示第*i*电压等级的下级变电容量值，单位kVA。

2.3. 指标的约束条件

1、电网与经济发展协调性

$D_1(t)$ 由计算两变量间的相对平均离差得到, 它的取值介于 0 到 1 之间。它的值越大, 表明两系统间的协调性越好。

$D_2(t)$ 一般介于 0 到 1 之间, 也可以大于 1。当其值为 1 时, 经济及电网系统间的协调性最好, 小于 1 或大于 1 分别表明电网发展滞后或超前于经济发展。

$D_3(t)$ 取值介于 0 到 1 之间, 其值越大, 表明两系统若干年间总的动态协调度越好。

2、电网与新能源发电协调性

随着传统化石能源的逐渐减少, 全球范围内新能源发电装机容量呈几何级增长。预计在 2050 年, 全球新能源发电占比将达到 50%。

在 2020 年一季度末, 青海新能源发电总装机容量 50.48%, 成为中国首个新能源装机容量超过 50% 的省份。预计未来 30 年时间内, 新能源发电仍会受到国家相关鼓励政策和新技术支持, 呈现快速增长趋势。

3、电网负荷容量协调性

饱和负荷期, 年均负荷增长率 < 7%, 各电压等级容载比范围区间:

500 kV 及以上, [1.5, 1.8];

220~330 kV, [1.6, 1.9];

110 kV, [1.8, 2.0]。

4、电网上下层级协调性

本文根据《城市配电网技术导则》(Q/GDW370-2009) 不同电压等级的容载比范围, 推算出饱和和负荷期不同层级容量匹配范围如下:

220 kV 变电站与 110 kV 变电站容量配比 [0.73, 1.16];

110 kV 变电站与 10 kV 配变容量配比 [0.72, 0.96]。

3. 电网发展协调性评价模型

3.1. 指标归一化方法

指标归一化方法有极值法、差值法、模糊数学法等, 各种归一化方法具有异曲同工之效。本文综合采用以上方法进行指标评分, 对于效益型指标, 指标越大, 得分越高, 计算公式如下。

$$y_i = c + \frac{x_i - m_i}{M_i - m_i} d \quad (\text{式 } 8)$$

式中, y_i 为指标得分; x_i 为指标值; M_i 、 m_i 分别为指标的理想值和不允许值; c 、 d 均为常数, 通常取 $c = 60$, $d = 40$ 。

对于适中型指标, 即指标值以稳定在某一范围内评分较高, 计算公式如下。

$$y_i = \begin{cases} \frac{100x_i}{a_i}, & x_i < a_i \\ 100, & a_i \leq x_i \leq b_i \\ 100 - \frac{100x_i}{b_i}, & x_i \geq b_i \end{cases} \quad (\text{式 } 9)$$

式中, y_i 为指标得分; x_i 为指标值; a_i 、 b_i 分别为指标的理想值区间范围, 且 $a_i < b_i$ 。

3.2. 指标的权重计算

权重计算有客观法和主观法。本论文选择变异系数法、熵权法、德尔菲法, 通过组合权重计算方法,

将这几种赋权方法得出的某一指标的权重相乘，然后进行归一化处理，得到组合权重。

1、变异系数权重

在方法学评价中来中，对于不同的检目，或同一项目不同的样本，变异系数 CV 比标准差具有更好的可比性。

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (\text{式10})$$

标准差与平均数的比值称为变异系数，又称“标准差率”，是衡量资料中各观测值变异程度的另一个统计量。变异系数可以消除单位和(或)平均数不同对两个或多个资料变异程度比较的影响。

对各指标的变异系数进行归一化处理，得到各指标的变异系数权重。

$$W_j = CV_j / \sum_{j=1}^m CV_j \quad (\text{式11})$$

2、熵权法

熵是信息论中，系统无序程度的一个度量。若系统可能处于多种不同的状态，每种状态出现的概率为 $(i=1,2,\dots,m)$ 时，则该系统的熵就定义为：

$$e = -\sum_{i=1}^m p_i \cdot \ln p_i \quad (\text{式12})$$

当 $p_i = 1/m (i=1,2,\dots,m)$ 时，即各种状态出现的概率相同时，熵取最大值，为： $e_{\max} = \ln m$ 。

现有 n 个待评项目， m 个评价指标，则形成原始评价矩阵的每个指标 x_{ij} ，求各指标值权重的过程为：

1) 计算第 j 个指标下第 i 个项目的指标值的比重 p_{ij}

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (\text{式13})$$

2) 计算第 j 个指标的熵值 e_j ：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (\text{式14})$$

其中， $k = 1/\ln m$ 。

3) 计算第 j 个指标的熵权 w_j ：

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (\text{式15})$$

4) 确定指标的综合权数

假设评估者根据自己的目的和要求将指标重要性的权重，确定为 α_j ， $j=1,2,\dots,n$ ，结合指标的熵权 w_j ，就可以得到指标 j 的综合权数：

$$\beta_j = \frac{\alpha_j w_j}{\sum_{i=1}^m \alpha_i w_i} \quad (\text{式16})$$

3、德尔菲法

德尔菲法又称为专家法，其特点在于集中专家的经验与意见，确定各指标权重，并在不断反馈和修改，直至各指标权重与其均值的离差不超过预先给定的标准为止，也就是各专家的意见基本趋于一致，以此时各指标权重的均值作为该指标的权重。

4、组合优化权重

权重组合优化的方法比较多，有平均聚合法、加权平均法、幂平均合成法、最小二乘法等。本论文采用加权平均法求得组合优化权重。

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^m w_i}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w_i} \quad (\text{式17})$$

式中， m 为采用的权重计算方法数量； n 为指标数量。

3.3. 差异化指标修正

由于地区资源、经济、人口密度等程度的不同，导致地区电网在建设时序、空间格局、发展重点等方面，也会有较大差异。

因此，采用相对重要比较值程度的方法，根据所建立的指标体系，对指标层的每个指标，甚至不同的地区属性，进行两两成对比较，这样所形成的比较矩阵，具有更大的修正弹性，比较矩阵如下所示。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{式18})$$

式中， a_{ij} 是因素*i*相对因素*j*的重要程度，取自然数1~9， $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。

然后根据几何平均法计算指标，计算各权重下的修正系数，如式所示：

$$k_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n A_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n A_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{式19})$$

3.4. 协调性综合评分

选用层次分析法，汇总各指标评价得分得到综合评分，计算公式为

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (\text{式20})$$

$$f(y, t) = \sum_{i=1}^n k_i y_i \quad (\text{式21})$$

式中： $f(x, t)$ 、 $f(y, t)$ 分别为电网的综合评分值、修正后的综合评价价值；

w_i 为权重系数；

k_i 为修正系数；

x_i 、 y_i 为评价指标值。

4. 实例应用

本文以华东某地级城市下属的R1、R2、R3、R4四个地区近5年电网发展数据为例，数据主要来源于城市统计年鉴、城市电网数据等，在上文理论研究基础上，对其协调性进行分析评价。

限于篇幅，论文中以电网与经济发展协调性指标分析为例，对指标实际值进行无量纲化处理，得到

具有可比性的指标归一化矩阵。并依次计算各地区其它指标的协调性，以及四个地区近 5 年电网发展的综合协调性，对新形势下电网建设发展方向提出建议。

4.1. 电网与经济发展协调性分析示例

由于公开可查数据不够全面，本实例中仅以人均用电量、人均 GDP 为代表，讨论部分特征量。虽然数据有限，但仍然可以挖掘出经济与电网协调性的特征。R1 人均用电量与人均 GDP 发展趋势，如图 2 所示。

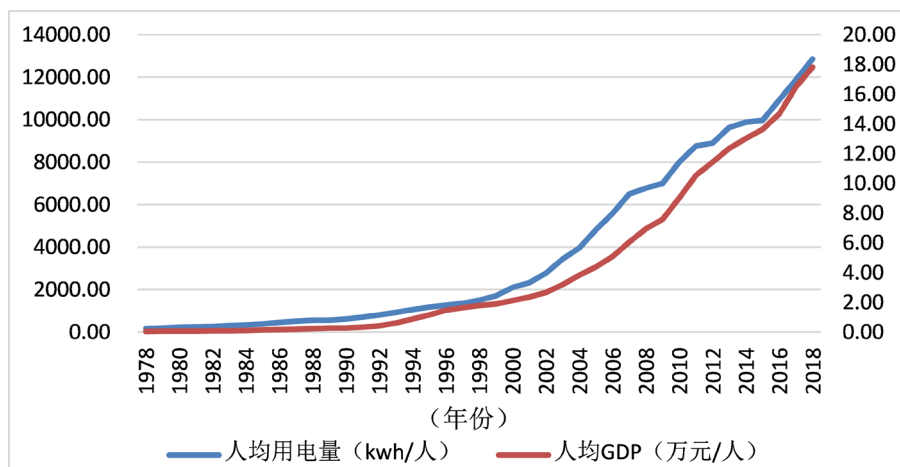


Figure 2. R1 per capita electricity consumption and per capita GDP development trend
图2. R1人均用电量与人均GDP发展趋势

由图2可以看出，R1人均用电量与人均GDP，都呈现持续上升发展趋势，整体发展趋势较为一致。尤其在1998~2014年之间，人均用电量增长明显强于人均GDP，呈现快速发展水平。2015年之后，二者发展水平进一步趋于平稳融合。地区R1电网与经济发展协调度计算结果，如表1所示。

Table 1. Calculation results of coordination degree between R1 power grid and economic development

表 1. R1 电网与经济发展协调度计算结果

年份	$D_1(t)$	$D_2(t)$	$D_3(t)$
2008	0.70	0.74	0.20
2009	0.75	0.78	0.21
2010	0.80	0.81	0.23
2011	0.86	0.87	0.26
2012	0.92	0.93	0.28
2013	0.92	0.92	0.30
2014	0.95	0.95	0.33
2015	0.99	0.99	0.35
2016	0.97	0.97	0.38
2017	1.00	1.00	0.40
2018	1.00	1.00	0.42

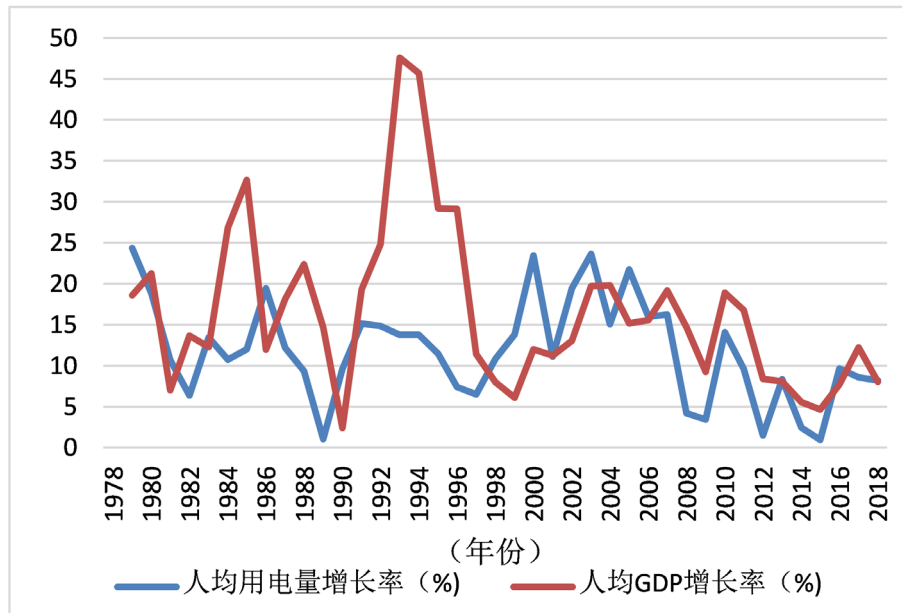


Figure 3. R1 per capita electricity consumption and per capita GDP growth rate
图3. R1人均用电量与人均GDP的增长率

由图3可知，R1人均用电量在1998年前的增长率维持在10%左右，增长较快；1998年~2008年间，平均增长率达到了15%左右，电网的发展更为迅猛。1998年之前，人均GDP增长率较高，平均在20%以上，个别年份迅速攀升，R1也出现了短暂的用电紧张，造成1998~2008年间人均用电量的快速增长。2014之后，平均增长率下降至8%左右。

4.2. 指标权重综合分析结果

根据4个地区电网协调性评价基础数据所形成的矩阵，以及本论文所提几种权重计算方法，计算出各评价指标权重，如表2所示。

Table 2. The weight of each evaluation index
表2. 各评价指标的权重

指标名称	变异系数权重	熵值系数权重	德尔菲权重	组合优化权重
静态协调度	0.081868	0.089611	0.107143	0.085085
动态协调度	0.116089	0.111323	0.071429	0.099923
新能源发电量占比	0.076311	0.090806	0.107143	0.080368
新能源装机容量与变电容量之比	0.000111	0.087362	0.142857	0.000151
500 kV 容载比	0.068368	0.109651	0.071429	0.057963
220 kV 容载比	0.280435	0.108216	0.071429	0.234645
110 kV 容载比	0.10255	0.111292	0.142857	0.17649
输对高供电容量配比	0.116089	0.111323	0.071429	0.099923
高对中供电容量配比	0.076311	0.090806	0.107143	0.080368
输对高容载比比值	0.081868	0.089611	0.107143	0.085085

4.3. 地区电网协调性趋势性分析

通过以上协调性评价指标体系、评价模型，测得 4 个地区近 5 年总体协调度得分，如表 3、图 4 所示。

Table 3. Overall coordination degree of power grids in various regions from 2015 to 2019

表 3. 各地区电网 2015~2019 年总体协调度

指标名称	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
R1	72.86	75.33	76.39	79.15	85.13
R2	65.31	67	71.44	75.18	72
R3	60	62	64	67	70
R4	68	71.94	74	77.6	78.12

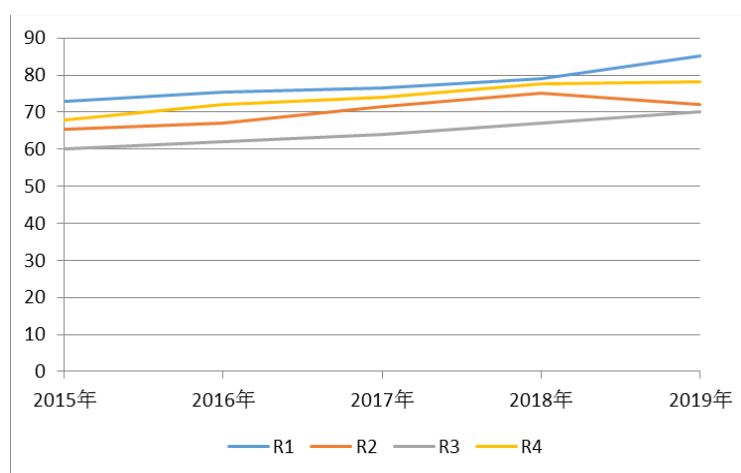


Figure 4. Line graph of regional coordination degree in recent 5 years

图 4. 地区近 5 年协调度折线图

从图 4 中可以直观看出，地区 R1、R2、R4 近年电网发展协调度呈现稳定发展趋势，协调性较好。地区 R2 上年度协调度得分下降，分析主要原因为电网层级协调指标中，110 kV 对 10 kV 供电容量配比得分较低，10 kV 供电容量容量不足。下一步电网规划方案中，中压配电网规划建设是其重要内容之一。

5. 结语

本文分析了电网转型发展形势下投资面临的问题。在现有国内外相关研究成果基础上，构建电网协调性发展评价指标体系、电网协调性评价模型等。

最后，以 4 个地区近 5 年电网数据为典型实例进行验证，评价结果及发展趋势曲线，可以为电网规划发展提供技术支持，为新形势城市电网高质量协调发展提供辅助决策。

基金项目

国网浙江省电力公司科技资助项目(5211NB1800XF)。

参考文献

- [1] 决胜全面建成小康社会，夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利[N]. 光明日报, 2017-10-28(02).

- [2] 毛伟明. 统一思想, 凝聚力量, 建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业[EB/OL]. http://www.js.sgcc.com.cn/html/main/col9/2020-04/22/20200422174834394314216_1.html, 2020-04-19.
- [3] 施婧, 李玮玮, 王晓辉, 等. 基于数据包络法对配电网投入产出效益的评价[J]. 浙江电力, 2017, 36(12): 63-69.
- [4] 郝伟, 朱文博. 城市电网规划项目的经济性分析指标研究[J]. 科技创新与应用, 2016(11): 193-195.
- [5] 白桦. 多权重因子影响的电网规划评价指标体系[J]. 浙江电力, 2015, 34 (11): 47-51.
- [6] 崔明建, 孙元章. 一种基于多层次灰色面积关联分析的电网安全综合评价模型[J]. 电网技术, 2013(12): 1-11.
- [7] 高澈, 牛东晓, 马明, 等. 大规模新能源区域互联消纳能力分析 & 综合评价方法研究[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 56-63.
- [8] 刘新元, 宋述勇, 郑惠萍, 等. 区域电网新能源消纳多变量综合评估模型研究 & 应用[J]. 电器与能效管理技术, 2018(1): 39-43.
- [9] 李喜兰. 考虑地区差异性电网协调发展评价方法的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(18): 67-71.
- [10] 王智冬, 李晖, 李隽, 等. 智能电网的评估指标体系[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 14-18.
- [11] 徐科, 刘明志, 张军, 等. 世界一流城市电网评价指标体系[J]. 电力建设, 2015, 36(11): 51-57.
- [12] 雷才嘉, 贾巍, 高慧, 等. 一流城市配电网的灵活适应性评价指标及计算方法[J]. 供用电, 2019, 36(5): 2-7.
- [13] 李金超. 基于 GRA 与 PCA 的电网发展协调性评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 49-53.
- [14] 谭显东, 单葆国, 吴姗姗, 等. 经济新常态下中国全社会用电量与 GDP 增速差距研究[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 5-9.
- [15] 刘树森. 地市电网发展诊断指标体系研究[J]. 电气技术, 2014(5): 63-67, 76.
- [16] 赵晓军, 余爽. 改革开放以来中国经济发展阶段与人力资本结构研究[J]. 经济科学, 2020, 42(1): 5-20.
- [17] 杨卫红, 蔡琦, 何永秀, 等. 北京电网发展与经济发展协调性评价[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1627-1630.