

地区电网 AVC 策略的评价体系研究

李 旻¹ 姜振超^{2,3} 范 宏⁴ 陈 斯⁴

(1. 国网四川省电力公司调度控制中心, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

3. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610072; 4. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对地区电网不同运行工况的 AVC 控制策略, 提出了一种地区电网 AVC 策略的评价体系, 通过分析地区电网 AVC 策略的各项运行指标, 掌握电网运行的运行状况。综合利用层次分析法建立综合评价体系框架, 通过对经济效益、控制效益两个层次上的指标分析, 得出电网综合运行的状态, 用于辅助电力调度部门和电力监管部门在联网运行中的决策支持, 对电网公司改善运行方式具有积极的促进作用。

关键词: 运行工况; 评价体系; 指标

Abstract: In view of the different operating conditions of regional power control strategy, an evaluation system of regional power grid AVC strategy is proposed. The various operation indicators of regional power grid AVC strategy are analyzed in order to get the information of grid operating condition. The framework of comprehensive evaluation system is established by analytic hierarchy process. Through the analysis on the indicators of economic benefits and control effectiveness, the integrated operating condition of power grid is obtained. It can help the power dispatching departments and electricity regulatory authorities in support of decision-making and improve the operating mode of power grid companies.

Key words: operating condition; evaluation system; indicators

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)06-0023-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.06.006

0 引言

地区电网作为省级电网的下一级电网, 由地区电力调度机构管辖, 一般具有电压等级较低、输电距离较短等特点^[1]。地区电网无功优化是保证地区电网安全稳定运行的重要方式。

科学合理的电力系统运行方式是供电系统向电力用户提供持续、安全、优质电能的重要保证。地区电网是联系主干输电网和电力负荷的重要中间环节, 随着中国电网建设迅猛发展, 电网设备不断增加, 地区电网各种运行工况变得更为复杂, 以经验为主要评判标准的传统工作方式已不能满足当前电力系统高度自动化发展的需要, 因此, 建立一套能够科学地评价地区 AVC 策略的方法具有重要的理论意义和现实意义^[2]。

下面提出了一种地区电网 AVC 策略的综合评价体系, 通过建立综合评价指标体系, 采用层次分析法将各项指标量化对比, 综合分析出电网在 AVC 控制前与 AVC 控制后运行状况。

1 地区电网电压控制

地区电网电压的调整主要是通过调整变电站之间的联络线路、投入或退出变电站的变压器、调节变压器的分接头以及投切电容器组等来进行^[3]。在传统的运行方式编制工作中, 工作人员往往更多的是借助经验初步制定出电网运行计划, 然后利用电力系统分析计算软件来进行电网的潮流和故障后果等方面的分析, 以验证该运行计划的可行性。但随着中国电网建设的迅猛发展, 地区电网规模显著扩大, 设备冗余度及自动化程度也大大增加, 虽然为电网调度机构灵活调整电网运行方式、保障电网安全经济运行创造了条件, 但同时, 电网可行的运行方式也大大增多, 运行方式编制人员面临着多种方案的取舍问题^[4]。因此, 对电力系统 AVC 指标体系的构建以及综合评价结果的计算, 成为电力系统运行状态的重要参考依据, 同时为电力部门编制电网运行方式提供依据。

电压是电能质量的指标之一^[5]。电力系统的

无功补偿与无功平衡是保证电压质量的基本条件^[6],无功补偿一般采取就地补偿的原则。电压优化运行通常采取变压器分接头档位调整和电容器投切相互配合,在不同电压等级母线电压不越上下限的条件下,达到电压优化控制运行的目的。

2 综合评价理论基础

所谓评价是指“根据确定的目的来测定对象系统的属性,并将这种属性变为客观定量的数值或者主观效用的行为^[7]”,综合评价是指对以多属性体系结构描述的对象系统做出全局性、整体性的评价,即对评价对象的全体根据所给的条件,采用一定的方法给每个评价对象赋予一个评价价值,再据此择优排序^[8]。综合评价能够对具有多种属性的事物或其总体优劣受多种因素影响的事物,做出一个合理的、能够综合这些属性的事物或影响因素的总体评判。综合评价的核心理念是将杂乱零散的单项指标进行系统性和层次性地汇总,得到一个整体的评价体系和评价结果并据此进行评判和决策。

2.1 评价体系构成要素

综合评价某一事物所涉及各相关要素构成评价要素集。各个要素的重要程度可能相同,也可能不同。用以评价该事物的一系列指标构成评价指标集^[9]。综合评价的构成包括评价目标、评价对象、评价者、评价环境、评价指标、指标权重、评价结果等几个要素。

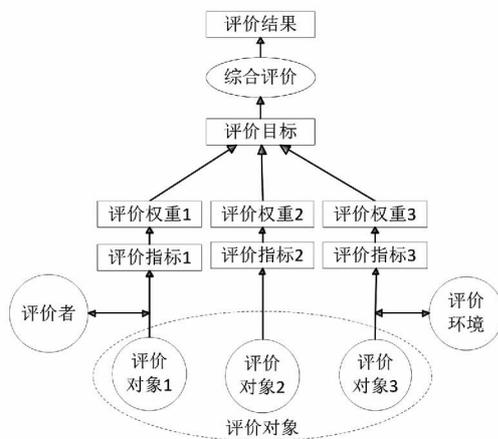


图1 综合评价步骤

2.2 综合评价步骤

综合评价的核心理念是将杂乱零散的单项指标进行系统性和层次性地汇总,得到一个整体的评价体系和评价结果并据此进行评判和决策,如图1所示。

2.3 综合评价方法

确定综合评价方法是综合评价体系的核心,评价者根据所给条件与评价对象确定评价目的,筛选并确定评价指标体系,确定各指标的权重系数,构建综合评价模型及评价算法,计算各指标的评价价值并分类列出评价结果,分析结果。

3 评价指标筛选及评价体系构建

评价指标的筛选和综合评价体系的建立是开展地区电网评估工作的关键,直接决定了电网评估的优劣度和可信度。地区电网综合评价体系的评价指标包括经济效益指标和控制效益指标。

3.1 经济效益指标

经济效益指标包括网损费用与设备调节费用。电网在传输电能时,电网中的各个电力设备包括输电线路、变压器等均产生有功损耗而损失电能。网损成本取决于各个输电线路上的潮流。有功线路损耗一般是由输电线路电阻引起的,每条线路的损耗都依赖于潮流,每条线路上的潮流都是由与之相连的发电机送出的潮流总和^[10]。电网运行时,由于系统网损而产生网损费用。设备调节次数是指在电压调节的过程中变压器分接头的动作次数和电容器组的投切次数,设备调节产生设备动作费用。

网损费用见式(1):

$$\Delta C_{PLOSS} = TC_P \Delta P \quad (1)$$

式中: ΔC_{PLOSS} 为网损费用; T 为某工况的运行时间,设定为1h; C_P 为单位网损成本,设定为0.6元/kW·h; ΔP 为地区电网运行时的网损值。

根据变压器分接头动作次数折算成变压器分接头动作费用。计算公式为

$$C_T = \sum_{j=1}^m C_{Tj} N_{Tj} \quad (2)$$

式中: C_{Tj} 为变压器分接头的单位动作成本,按照30万元开关1万次来算,设定220kV变压器分接头动作为30元/次和110kV变压器分接头动作为30元/次; N_{Tj} 为变压器动作次数; C_T 为变压器分接头动作费用。

根据电容器组投切次数折算成电容器组动作费用,计算公式为

$$C_C = \sum_{j=1}^m C_{Cj} N_{Cj} \quad (3)$$

式中: C_{Cj} 为电容器组投切的单位动作成本,以10kV真空开关15万元动作5000次进行计算,开关单位动作成本为30元/次; N_{Cj} 为电容器组投切次数; C_C 为电容器组投切的动作费用。

3.2 控制效益指标

结合电网的运行状态及最新的研究成果,在改进传统的评价效益指标的前提下,提出电网AVC策略的控制效益指标。控制效益指标主要包括电压合格率、关口功率因数合格率、电压偏移率。电压合格率是指电网在运行时电压合格母线数与运行母线数之比,反映了电压运行水平;关口功率因数合格率按照省级AVC主站下发的关口因数判断关口功率因数合格率;电压偏移率是指每条母线电压偏移率的总和与母线数之比。

4 评价体系构建及综合评价

4.1 评价体系构建

通过对各类效果指标的分析,分层分级构建了能够直接反映电网AVC策略的特性类指标,以此为基础建立完整的地区电网综合评价指标体系的递阶性层次结构。合理的指标体系对于提高评价效率和评价效果会产生直接的影响^[11],所提出的指标体系为3层结构,聚合度高,结构简单,能够全面刻画电网电压调节过程中的特征,具有较好的整体性和适应性。各项底层指标意义明确,数据搜集后通过统计获取计算所需的指标值,数据来源方便且计算方法简单。地区电网AVC策略的评价体系结构如图2所示。

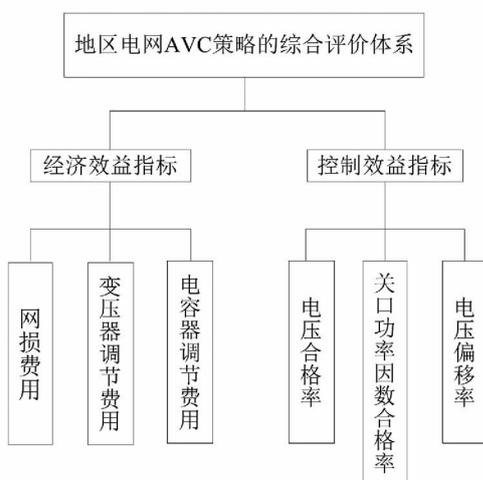


图2 地区电网AVC策略综合评价体系结构

4.2 模糊评价的基本步骤

评价指标权重系数的确定是评价的重要步骤,其合理与否直接关系到评价结果的可信程度。模糊评价方法应用模糊集合理论将一些边界不清、不易定量的因素定量化,通过对评价对象进行单因素评价,再考虑各因素的权重,给出一个评价结果。运用

电力模糊评价的模型为以下几个步骤:

步骤1:建立因素集。因素集是影响评价对象的各种因素组成的集合,用 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 表示。

步骤2:建立判断集。判断集也称评语集,是由评价者对评价对象可能做出的各种总的评价结果组成的集合,用 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 表示,其中 v_i 代表各种可能的评价结果。

步骤3:对单因素模糊评价时,设请第 N 位专家对单个因素 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 进行评价,每位专家根据自己的评价填写下列表格,设第 k 位专家的评价意见如表1。

表1 专家意见表

因素	评语				
	v_1	v_2	v_3	...	v_m
U_1	$x_{11}^{(k)}$	$x_{12}^{(k)}$	$x_{13}^{(k)}$...	$x_{1m}^{(k)}$
...
U_n	$x_{n1}^{(k)}$	$x_{n2}^{(k)}$	$x_{n3}^{(k)}$...	$x_{nm}^{(k)}$

$x_{ij}^{(k)}$ 是第 k 位专家认为的评价对象按第 i 个因素 U_i 获得第 j 个评语的隶属度。若按百分制赋值,则总的隶属度 r_{ij} 为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N x_{ij}^{(k)}}{100N} \quad (5)$$

据此可以得到评价矩阵 R 为

$$R = (r_{ij}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad r_{ij} \in [0, 1] \quad (6)$$

式中 r_{ij} 是综合所有专家意见得到的评价对象按第 i 个因素 U_i 获得第 j 个评语 v_j 的隶属度。

步骤4:确定评价指标权重系数集。确定评价指标权重系数集的方法主要是层次分析法^[12]。评价指标权重系数集有两类:第1类是向量归一化方法, $\sum_{i=1}^n a_i = 1, a_i > 0$ 即所有权重指标系数之和为1;第2类为向量正规化法, $\sqrt[n]{\sum_{i=1}^n a_i} = 1, a_i > 0$, 即所有权重指标量化值为1。此处为初始权重的“重要”程度,因此权重因素集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 则可当作初始权重集合上的模糊集合。

步骤5:当权重集 A 和单因素评价矩阵 R 为已知时,便可用模糊变换来进行综合评价。模糊综合评价计算方法如下:

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m) = A \oplus R$$

$$= (a_1, a_2, \dots, a_n) \oplus \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: b_j 是综合考虑所有因素影响时评价对象对象属于第 j 个评语 v_j 的隶属度; B 是属于判断集 V 上的模糊集合 “ \oplus ” 是某种合成算。通常采用加权平均模型 $M(\oplus, +)$, 其计算方法为 $b_j = \sum_{i=1}^m a_i \cdot r_{ij} (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

4.3 多级模糊评价的步骤

当某事物的因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 中, 各因素又由多个子因素构成。对这种个数较多的综合评价问题, 通常采用二级、三级等多级综合评价方法来解决。其中, 二级综合评价的步骤为:

1) 建立因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$, 满足 $\bigcup_{i=1}^m U_i = U, U_i \cap U_j = \Phi, i \neq j$ 。再将 U_i 划分为子因素集 $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}\}$ 。根据评价需要, 可继续划分下去。

2) 对每一个 U_i 按一级综合评价方法进行模糊综合评价。设评价集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 权重向量集 $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ 。若对 U_i 的 n 个因素进行单因素评价后得到单因素评价矩阵 R_i , 采用相同的模糊算子将 R_i 和权重向量 A_i 模糊合成, 计算出该层次因素集 U_i 的评价结果 B_i 如下:

$$B_i = A_i \oplus R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}) \quad (8)$$

3) 对 U 代表的事物进行综合评价(二级评价)。

由 B_1, B_2, \dots, B_m , 可得 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ 的单因素评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

若 u_1, u_2, \dots, u_m 的权重向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, 则对 U 代表的事物的综合评价为

$$B = A \oplus R = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (10)$$

与二级综合评价法类似, 多级模糊综合评价就是依次反复进行这种合成运算, 从最低层次到最高层次, 直到得到最终结果。

5 算例分析

对地区电网 AVC 策略的综合评价的评语分为

• 26 •

5 个等级。建立评语集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。计算前需量化评判集, 将描述型评判等级转化为 0 ~ 1 之间的值。如“很好—0.9”, “较好—0.7”, “一般—0.5”, “较差—0.3”, “很差—0.1”等。建立地区电网 AVC 策略的评价指标体系如表 2 所示。

表 2 地区电网 AVC 策略的评价指标体系

对象集	一级指标	二级指标
地区电网 AVC 策略 评价(u)	经济效益 指标 (u_1)	网损费用 u_{11}
		变压器调节费用 u_{12}
	控制效益 指标(u_2)	电容器调节费用 u_{13}
		电压合格率 u_{21}
		关口功率因数合格率 u_{22}
		电压偏移率 u_{23}

算例 1: 以四川某电网某区域的某变电站 110 kV 母线电压越上限, 10 kV 电压偏低, 但未越限为例, 对控制前后各项指标进行分析, 计算出控制前后各指标值并对其综合评价。

控制前后经济效益指标值见表 3。

表 3 算例 1 控制前后经济效益指标值

二级指标	网损 (费用 u_{11})	变压器 调节数量 (费用 u_{12})	电容器 调节数量 (费用 u_{13})
控制前	6.957 (4 174)	-	-
控制后	7.007 (4 204)	4(120)	1(30)

控制前后控制效益指标值见表 4。

表 4 算例 1 控制前后控制效益指标值

二级指标	电压合格率 u_{21}	关口功率因素 合格率 u_{22}	电压偏移率 u_{23}
控制前	0.98	0.94	0.014 6
控制后	1	1	0.015 0

采用德尔菲法对每个因素进行评价, 可得到控制前经济效益指标评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.233 & 0.5 & 0.134 & 0.133 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

控制后经经济效益指标评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.467 & 0.2 & 0.133 & 0 \\ 0.167 & 0.633 & 0.167 & 0.033 & 0 \\ 0.667 & 0.167 & 0.166 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

控制前控制效益指标评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.167 & 0.667 & 0.166 & 0 & 0 \\ 0.181 & 0.667 & 0.152 & 0 & 0 \\ 0.333 & 0.333 & 0.334 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

控制后控制效益指标评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.367 & 0.333 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

采用层次分析法确定评价指标权重系数集。首先构造判断矩阵元素,一般采用1~9及其倒数的标度方法反映个元素的重要性。具体量化数值见表5。

表5 量化数值表

等级	远远重要	远重要	更重要	相对重要	同样重要
数值	9	7	5	3	1

针对经济效益指标进行两两比较,构造出判别矩阵,见表6。

表6 判别矩阵

	u_{11}	u_{12}	u_{13}
u_{11}	1	3	3
u_{12}	1/3	1	1
u_{13}	1/3	1	1

计算此判断矩阵的最大特征根以及其对应的特征向量,此特征向量就是各评价因素的重要性排序,也即是权重系数的分配。将此特征向量归一化,得到经济效益指标的权重见表7。

表7 算例1经济效益指标权重

评价因素	u_{11}	u_{12}	u_{13}
权重	0.6	0.2	0.2

同理可得控制效益指标权重见表8。

表8 算例1控制效益指标权重

评价因素	u_{21}	u_{22}	u_{23}
权重	0.454	0.454	0.092

一级指标权重见表9。

表9 算例1一级指标权重

评价因素	u_1	u_2
权重	0.4	0.6

采用加权平均模型 $M(\oplus, +)$ 运算规则,计算出控制前后综合评价,见表10。

表10 算例1控制前后综合评价情况

评价等级	很好	较好	一般	较差	很差
控制前	0.329	0.502	0.137	0.032	0
评价后	0.676	0.196	0.093	0.035	0

算例2:以四川某电网某区域电压越上限为例,对控制前后各项指标进行分析,计算出控制前后各指标值并对其综合评价。

控制前后经济效益指标值见表11。

表11 算例2控制前后经济效益指标值

评价因素	网损 (费用 u_{11})	变压器 调节数量 (费用 u_{12})	电容器 调节数量 (费用 u_{13})
控制前	7.781(4 669)	-	-
控制后	7.821(4 693)	0(0)	4(120)

控制前后控制效益指标值见表12。

表12 算例2控制前后控制效益指标值

评价因素	电压合格率 u_{21}	关口功率因 素合格率 u_{22}	电压偏移率 u_{23}
控制前	0.93	0.982	0.014 6
控制后	1	1	0.014 2

采用德尔菲法对每个因素进行评价,可得到控制前经济效益指标评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.233 & 0.412 & 0.234 & 0.121 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

控制后经济效益指标评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.153 & 0.403 & 0.315 & 0.129 & 0 \\ 0.231 & 0.694 & 0.075 & 0 & 0 \\ 0.167 & 0.633 & 0.167 & 0.033 & 0 \end{bmatrix}$$

控制前控制效益指标评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.167 & 0.568 & 0.265 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.333 & 0.333 & 0.334 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

控制后控制效益指标评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.324 & 0.397 & 0.279 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

采用层次分析法确定评价指标权重系数集。具体量化数值同算例1表5。

针对经济效益指标进行两两比较,构造出判别矩阵。判别矩阵同算例1表6。

得到经济效益指标的权重分别为 $u_{11} = 0.6$; $u_{12} = 0.2$; $u_{13} = 0.2$ 。控制效益指标权重分别为 $u_{21} = 0.454$; $u_{22} = 0.454$; $u_{23} = 0.092$ 。

一级指标权重 $u_1 = 0.4$; $u_2 = 0.6$ 。

采用加权平均模型 $M(\oplus, +)$ 运算规则,计算出控制前后综合评价,见表13。

表 13 算例 2 控制前后综合评价情况

评价等级	很好	较好	一般	较差	很差
控制前	0.418	0.429	0.121	0.032	0
控制后	0.631	0.225	0.111	0.033	0

上述结果表明在策略执行后评价结果中隶属于很好的值最大,较策略执行前有了大幅提高,因此策略执行后综合评价为系统运行很好。

6 总结

地区电网 AVC 策略的运用是地区电网稳定可靠运行的重要保证,通过变压器分接头档位调节与电容器组投切操作实现对电网电压调节与无功补偿。地区电网 AVC 策略评价体系的构建,有效地对电网的运行状态及运行效益做出了较为准确的评价。通过各项指标的逐一量化分析,直观地反映出电网的各项运行指标,为电网的进一步优化运行打好基础。

参考文献

[1] 王昊. 地区电网经济运行与优化算法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
 [2] 田洪. 地区电网运行方式评价方法的研究[D]. 上海:

(上接第 9 页)

[2] 张丽,徐玉琴,王增平,等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168 - 174.
 [3] 李中玉,孙胜洪,王睿. 并网发电机组网源协调原则的探讨[J]. 华东电力, 2013, 41(3): 674 - 676.
 [4] 孙惠娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 123 - 128.
 [5] 杨金刚,吴林林,刘辉,等. 大规模风电汇集地区风电机组高电压脱网机理[J]. 中国电力, 2013, 46(5): 28 - 33.
 [6] 许晓菲,牟涛,贾琳,等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 15 - 19.
 [7] 乔颖,鲁宗相,徐飞. 双馈风电场自动电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 96 - 101.
 [8] 栗然,唐凡,刘英培,等. 双馈风电场新型无功补偿

上海交通大学, 2009.

[3] 郑晶晶,杨勇,王维洲. 地区电网无功电压优化运行集中控制系统[J]. 电网与清洁能源, 2007, 27(6): 30 - 33.
 [4] 许杏桃. 地区电网无功电压优化运行与安全控制[J]. 电力建设, 2004, 25(12): 36 - 38.
 [5] 何仰赞,温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
 [6] 许杏桃. 地区电网无功电压优化运行与安全控制[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(1): 29 - 31.
 [7] 三浦武雄,滨冈尊. 现代系统工程学导论[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1985: 1 - 20.
 [8] 王宗军. 综合评价的方法、问题及研究趋势[J]. 管理科学学报, 1998, 1(1): 73 - 79.
 [9] 少强,李友俊,田庆旺. 综合评价指标体系构建方法[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(3): 74 - 76.
 [10] 杜正春,夏道止. 输电系统网损分摊[C]. 中国高校电自年会论文集, 2001.
 [11] 冯新龙,孙岩,林声宏. 配电网综合评价指标体系及评估方法[J]. 广东电力, 2013, 26(11): 20 - 25.
 [12] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

作者简介:

李 昱(1970), 高级工程师, 主要从事电网调度运行及管理。(收稿日期: 2016 - 10 - 08)

与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 16 - 23.

[9] 乔颖,陈惠粉,鲁宗相,等. 双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 15 - 22.

作者简介:

李朝阳(1986), 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;

常喜强(1976), 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制及调度自动化;

樊国伟(1976), 工程师, 研究方向为调度自动化;

张 锋(1978), 硕士、高级工程师, 研究方向为调度自动化;

王 衡(1984), 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制调度自动化;

亢朋朋(1986), 硕士、工程师, 研究方向为电力系统分析与控制。

(收稿日期: 2016 - 07 - 15)