

[文章编号] 1003—4684(2020)04-0069-06

基于层次分析法的风电场边坡生态修复植物优选

王瀚文¹, 杨智勇^{1,2}, 万 娟^{1,2}, 李 准¹

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430000; 2 湖北省生态道路工程研究中心, 湖北 武汉 430000)

[摘 要] 为修复随州风电场建设导致的裸露边坡,保障风电场的绿色发展,依据生态修复的原则,结合植物的各种特性,进行生态修复植物的优选。首先根据现场调研的成果确定 22 种初筛植物,再利用层次分析法构造出植物优选层次图,然后从适应性、抗逆性、经济性、再生性以及景观性五个因素进行权重排序,再根据因素层权重得到目标权重,最终在此基础上筛选出适合本地区生态修复的优质植物。研究结果为适合修复该区域的九种优质植物:草本类植物为狗牙根、高羊茅、三叶草;灌木类植物为胡枝子、盐肤木、多花木兰;乔木类植物为构树、侧柏、松树,研究成果可为风电场区边坡的生态修复提供参考。在后续研究中可根据具体的地理环境条件,将理论与实践相结合,对植物进行更合理的权重赋值,对植被恢复效果做长期观测与研究。

[关键词] 风电场;生态修复;层次分析法;筛选;优质植物

[中图分类号] S19, X37 [文献标识码] A

随着经济的飞速发展,地球上的化石能源被不断开采,面临着日益枯竭的情况,全世界开始着力于新型能源的开发与利用,其中风能作为一种最常见的能源引起了社会的广泛关注。但是在风电场的建设过程中,山体开挖或多或少会破坏原有的植被环境并造成水土流失,虽然风能是一种清洁能源,但若是在开发过程中破坏了原有环境,就有悖于风能利用的初衷。如果不采取有效的环境保护措施,风电场建设将会进一步加深环境的破坏。因此,风电场生态修复问题亟需解决并具有重要的现实意义^[1-4]。

近年来,生态环境建设成为热点问题,在环境建设中风电场区的生态修复日益受到重视,国内针对风电场建设对环境产生的影响以及风电场区生态修复方法等方面有着大量研究。王森通过探讨风电场建设对区域环境的影响以及生态修复方法,从而为修复风电场区域内的环境提供合理的参考意见^[5];毕娜提出了风电场区生态修复的原则与技术要求,为风电场区生态修复的验收提供了依据^[6];徐康提出在沙漠中修建风电场有利于沙漠植被的生长^[7];刘浩军在修复江西永丰风电场生态环境时,对上下边坡有针对性地采用多种环保、水保、植被恢复的工程措施^[8]。刘胜根据地理位置、开发强度、地貌、海拔、植被情况以及修复方向等因素将云南风电场划

分为若干修复区,并针对不同修复区的突出问题采取不同的修复措施,保证了较好的生态修复效果,修复后的植物群落具有良好的稳定性和持久性,缺点是分区修复耗时耗力,性价比低,不能及时地对裸露边坡进行修复^[9]。

目前,现有的研究基本是总结风电场区建设时对环境的影响以及笼统的风电场区生态修复方法,并没有对风电场区生态修复的优良植被进行深入研究,笔者根据研究场地特点和社会经济发展状况,从生态环境和生态功能的重要性出发,以湖北随州风电场为研究区域,采用层次分析法,对生态修复植物进行综合评价,为以后风电场区生态修复工作提供借鉴。

1 研究方法

1.1 植物初选

湖北省随州风电场位于随县万和镇辖区内的山脊上,高程在 200~800 m 之间,全年暴雨多集中于 4—9 月,最大日降雨量为 228.3 mm,多年平均降雨量在 1200~1700 mm,风电场区植被属中亚热带常绿阔叶林和落叶阔叶混交林,有着大量的原生本土植物,但是并非所有的本土植物都适用于风电场的生态修复,根据风电场区样地的基本情况以及本土优势植物种类进行调研,借鉴了当地环境生态修复

[收稿日期] 2019—12—02
[基金项目] 国家科技重大专项(2016YFC05022208);国家自然科学基金(51608182, 51678223)
[第一作者] 王瀚文(1995—),男,江苏连云港人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为生态护坡
[通信作者] 杨智勇(1982—),男,湖北武汉人,工学博士,湖北工业大学讲师,研究方向为生态岩土工程

的经验,初步筛选出 22 种植物可用于风电场的环境修复,其中有 7 种乔木类植物:栗子树、核桃树、杉树、松树、侧柏、构树、槐树;8 种草本类植物:狗牙根、高羊茅、三叶草、白茅、早熟禾、紫花苜蓿、小蓬草、薹白;7 种灌木类植物:多花木兰、胡枝子、盐肤木、紫穗槐、悬钩子、高粱泡、野花椒,植物种类分布如图 1 所示。

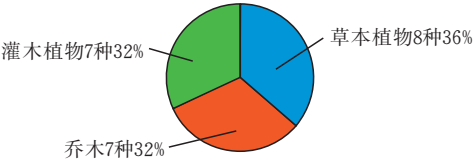


图 1 初筛植物占比

因为不同的植物有不同的特性,笼统的选择具有盲目性,无法精确地优选出最适合风电场区域的植物,如果仅根据植物的某一特性来选择植物,那就忽视了植物的其他优缺点,无法做到全面综合地选择合适的植物。层次分析法作为一种半定量的分析方法,可有助于选择出最为适宜的生态修复植物。

由于有乔木、灌木、草本 3 种不同的植物种类且 3 种植物种类不宜混杂在一起进行选择比较,不能客观地给出各个植物的优劣次序,因此本文分别对乔木类、草本类以及灌木类植物使用层次分析法来优选出适宜风电场区生态修复的优质植物。

1.2 层次分析法

层次分析法,是指将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。

1.2.1 层次结构模型 将决策的目标、考虑的因素和决策对象按它们之间的相互关系分为最高层(目标层)、中间层(因素层)和最低层(方案层)。

根据适应生态学理论中“尊重自然、正视自然、保护自然、恢复自然”的原则,风电场区边坡绿化和生态修复的物种应具有耐干旱贫瘠,适应性强;根系发达,能固持土壤;生长迅速,分枝稠密兼具景观效果;提高土壤的保水保肥能力等特点。因此因素层采用适应性、抗逆性、经济性、再生性、景观性五个因素^[10-18]。根据以上因素可建立生态修复植物优选层次结构模型(图 2)。

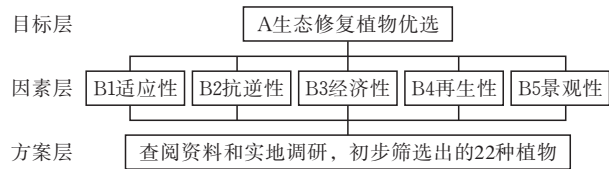


图 2 初选植物选优层次结构

1.2.2 构造判断矩阵 在确定各层次各因素之间的权重时,如果是定性的结果具有片面性,不容易被

别人接受,因此引入判断矩阵:将两个因素进行相互比较,并按其重要程度判定等级,比较结果构成的矩阵称作判断矩阵,重要性等级及其赋值如表 1 所示。

表 1 传统比例标度

量化值	因素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 相比
1	同等重要
3	稍微重要
5	较强重要
7	强烈重要
9	极端重要
2,4,6,8	两相邻判断的中间值

1.2.3 层次单排序及其一致性检验 层次单排序是指对于上一层某因素而言,本层次各因素之间重要性的排序。层次单排序是否合理,需要进行一致性检验,所谓一致性检验是指对判断矩阵 A 确定不一致的允许范围。

用 $\lambda_{\max} - n$ 数值的大小来衡量判断矩阵 A 的不一致程度,定义一致性指标 CI,计算公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$
 (1)

当 $CI = 0$,判断矩阵 A 具有完全一致性;当 CI 越大,判断矩阵 A 不一致性越严重。

为了衡量 CI 的大小,引入了随机一致性指标 RI,计算公式如下:

$$RI = \frac{CI_1 + CI_2 + \cdots + CI_n}{n}$$
 (2)

其中,随机一致性指标 RI 和判断矩阵的阶数有关,如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标 RI 标准值

阶数	RI	阶数	RI	阶数	RI
1	0	4	0.90	7	1.32
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24	9	1.45

考虑到一致性的偏离随机性较大,因此检验判断矩阵是否具有满意的一致性时,还应将 CI 和 RI 进行比较,得出检验系数 CR,计算公式如下:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$
 (3)

如果 $CR < 0.1$,则认为判断矩阵 A 不一致性程度在容许范围内,通过一致性检验,此时,可用判断矩阵 A 的特征向量作为权向量,否则就不具有满意一致性,需要对判断矩阵 A 进行校正。

1.2.4 层次总排序 确定某层所有因素对于目标层相对重要性的排序权值过程,称为层次总排序。这一过程是从最高层到最底层依次进行的。对于最高层而言,其层次单排序的结果也就是总排序的结果。

因素层(B) m 个因素对目标层(A)的单排序为 b_1, b_2, \dots, b_m ; 方案层(C) n 个因素对因素层(B)的单排序为 $c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj} (j = 1, 2, \dots, m)$; 方案层(C)的层次总排序即总目标权值为:

$$\omega = \sum_{j=1}^m a_j b_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots)$$

(4)

2 生态修复植物优选

2.1 乔木类优选

2.1.1 乔木植物层次结构模型 根据初次筛选的乔木植物的适应性、抗逆性、经济性、再生性、景观性 5 个因素建立乔木植物层次结构模型。

2.1.2 因素层单排序 不同恢复区有不同的气候特点与本土植物,生态修复的最终目标是修复植物能长期的生存并且与原生植物群落融合,因此选择适应当地气候并易于与当地植物品种结合的植物,有利于维持长期的生态恢复效果;裸露边坡环境恶劣,缺水少肥,在初期养护过后,植物应能靠自然条件持续生长,因此所选植物必须具有抗旱、抗寒等抗逆性能力;边坡生态修复还应考虑植物的种植成本与经济产出,一味追求种植植物而不考虑其生存条件和绿化成本是不可取的,要将生态破坏的损失程度降低到最小;生态修复要考虑对整个植物群落进行逐步修复,既要有快速绿化效果,也要有极强的再生能力,必须具备较好的自我更新能力,才能发挥持久的绿化效果;通过考虑乔灌木与草本植物的合理搭配,形成多层次的立体结构,能够充分利用光、水、气等自然资源,达到最优的景观和生态效益^[19]。因素层 5 个因素成对比较后重要程度打分情况如表 3 所示。

表 3 因素层判断矩阵

	适应性	抗逆性	经济性	再生性	景观性
适应性	1	1/2	5	2	3
抗逆性	2	1	5	3	4
经济性	1/5	1/5	1	1/3	1
再生性	1/2	1/3	3	1	2
景观性	1/3	1/4	1	1/2	1

将表 3 形成矩阵,可求得其最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.07$,并将特征向量归一化得权向量

$$\omega = (0.2736 \ 0.4164 \ 0.0675 \ 0.1586 \ 0.084)^T$$

根据公式(1)得 $CI = 0.0175$ 根据公式(3)得 $CR = 0.016 < 0.1$ 满足一致性检验。

2.1.3 方案层单排序 首先,将方案层中的乔木进行因素对比,通过查阅文献资料得出各类植物的生长特性以及经济价值,并对随州风电场区进行调研(图 3)。现场调研分为春冬两个季节,主要考察植物的抗逆性能以及再生能力,综合分析后对其各因

素重要性比较打分。



图 3 风电场区植被调研

以适应性为例,栗子树吸水、吸肥力强,也耐瘠薄,适应性强;核桃树适应于土壤深厚、疏松、肥沃、湿润、气候温暖凉爽的生态环境,因此栗子树相较于核桃树适应性较为重要,根据表 1 中的打分原则,打分为 5,其他植物适应性打分如表 4 所示。

表 4 乔木适应性判断矩阵

	栗子树	核桃树	杉树	松树	侧柏	构树	槐树
栗子树	1	5	3	2	1	1/3	4
核桃树	1/5	1	1/2	1/3	1/5	1/9	1/2
杉树	1/3	2	1	1/2	1/3	1/7	1/2
松树	1/2	3	2	1	1/2	1/4	2
侧柏	1	5	3	2	1	1/3	4
构树	3	9	7	4	3	1	8
槐树	1/4	2	2	1/2	1/4	1/8	1

将表 4 形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.13$,并将特征向量归一化得权向量

$$\omega_1 = (0.1724 \ 0.033 \ 0.0518 \ 0.097 \ 0.1724 \ 0.4153 \ 0.0581)^T$$

$CI = 0.021, CR = 0.016 < 0.1$ 满足一次性检验。

将方案层中的乔木进行因素对比,以抗逆性为例,栗子树喜光,耐旱耐寒,对空气中的二氧化硫等有害气体抗性强;核桃树高大,抗旱性强,抗寒能力差,在比较寒冷地区容易遭受冻害,因此栗子树相较于核桃树抗逆性为较重要,根据表 1 的打分原则,打分为 4,其他乔木两两比较并打分后形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.13$,特征向量归一化得权向量

$$\omega_2 = (0.15720 \ 0.04380 \ 0.03230 \ 0.2378 \ 0.0985 \ 0.3674 \ 0.0631)^T$$

$CI = 0.021, CR = 0.019 < 0.1$ 满足一次性检验。

将方案层中的乔木根据经济性对比,栗子树被作为优秀的风景树栽植,栗子含有丰富的营养物质;核桃树木材坚实,是很好的硬木材料,核桃仁可生吃和榨油,因此栗子树相较于核桃树经济性为稍重要,根据表 1 的打分原则对其打 2 分,其他乔木两两比较并打分后形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.1$,特征向量归一化得权向量

$$\omega_3 = (0.0396 \ 0.0265 \ 0.1006 \ 0.1795 \ 0.2657 \ 0.1224 \ 0.2657)^T$$

$CI = 0.017, CR = 0.013 < 0.1$ 满足一次性检验。

将方案层中的乔木根据再生性对比,栗子树根系损伤后愈合能力较差,根部破伤后,皮层与木质部易分离,伤根后需较长时间才能萌发新根;核桃树越

冬能力差,遭遇冻害会导致枝干皮裂甚至整株树死亡,因此栗子树相较于核桃树相较于再生能力为同等重要,根据表 1 的打分原则对其打 1 分,其他乔木两两比较并打分后形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=7.08$,特征向量归一化得权向量

$$\omega_4=(0.0765\ 0.0765\ 0.046\ 0.046\ 0.3669\ 0.2515\ 0.1366)^T$$
$$CI=0.013,CR=0.01<0.1$$
 满足一次性检验。

将方案层中的乔木根据景观性对比,栗子树在各地的园林绿化中,被作为优秀的风景树栽植;核桃树秋冬季节开始枯萎,树上变得光秃,因此栗子树相较于核桃树景观功能为较重要,根据表 1 的打分原则,对其打 4 分,其他乔木两两比较并打分后形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=7.15$,特征向量归一化得权向量

$$\omega_5=(0.1358\ 0.0386\ 0.0703\ 0.2351\ 0.1358\ 0.0596\ 0.3249)^T$$
$$CI=0.025,CR=0.016<0.1$$
 满足一次性检验。

2.1.4 乔本植物总排序 根据公式(4)得出方案层(C)目标权值:

$$\omega=(0.1388\ 0.0444\ 0.0476\ 0.1647\ 0.1757\ 0.3198\ 0.1091)^T$$
目标权值为构树>侧柏>松树>栗子树>槐树>杉树>核桃树,故最后推荐选取构树、侧柏和松树为适合本地区生态修复的乔木。

2.2 草本类优选

2.2.1 草本植物层次结构模型 根据初次筛选的草本植物的适应性、抗逆性、经济性、再生性、景观性五个因素建立草本植物层次结构模型。

2.2.2 因素层单排序 权向量

$$\omega=(0.2736\ 0.4164\ 0.0675\ 0.1586\ 0.084)^T$$

2.2.3 方案层单排序 将方案层中的草本植物进行因素对比,以适应性为例,打分情况如表 5 所示,将表 5 形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=8.0834$,特征向量归一化得

$$\omega_6=(0.2367\ 0.1372\ 0.0412\ 0.0795\ 0.2367\ 0.0524\ 0.0792\ 0.1372)^T$$
$$CI=0.0119,CR=0.0084<0.1$$
 满足一次性检验。

对方案层中的各草本植物根据植物自有属性对其他因素进行对比,按照表 1 的打分原则,两两比较打分后形成矩阵并求得权向量。

方案层对比于因素层 B2(抗逆性):

$$\omega_7=(0.2972\ 0.1672\ 0.0585\ 0.1031\ 0.0364\ 0.1031\ 0.0672\ 0.1672)^T$$
$$CI=0.011,CR=0.008<0.1$$
 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B3(经济性):

$$\omega_8=(0.1974\ 0.0401\ 0.1974\ 0.0686\ 0.1104\ 0.3023\ 0.0299\ 0.054)^T$$
$$CI=0.013,CR=0.009<0.1$$
 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B4(再生性):

$$\omega_9=$$

$$(0.1909\ 0.1909\ 0.3578\ 0.0343\ 0.0436\ 0.1018\ 0.0273\ 0.0536)^T$$
$$CI=0.025,CR=0.018<0.1$$
 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B5(景观性):

$$\omega_{10}=(0.0399\ 0.0399\ 0.2138\ 0.1034\ 0.0808\ 0.3319\ 0.1504\ 0.0399)^T$$
$$CI=0.011,CR=0.008<0.1$$
 满足一次性检验。

表 5 草本适应性判断矩阵

	狗 牙根	高 羊茅	三 叶草	白 茅	早熟 禾	紫 苜蓿	小 蓬草	薹 白
狗牙根	1	2	5	3	1	4	3	2
高羊茅	1/2	1	3	2	1/2	3	2	1
三叶草	1/5	1/3	1	1/2	1/5	1/2	1/2	1/3
白茅	1/3	1/2	2	1	1/3	2	1	1/2
早熟禾	1	2	5	3	1	4	3	2
紫苜蓿	1/4	1/3	2	1/2	1/4	1	1/2	1/3
小蓬草	1/3	1/2	2	1	1/3	2	1	1/2
薹白	1/2	1	3	2	1/2	3	2	1

2.2.4 草本植物总排序 根据公式(4)得出方案层(C)目标权值:

$$\omega=(0.2355\ 0.1435\ 0.1237\ 0.0834\ 0.1011\ 0.1217\ 0.0686\ 0.1227)^T$$
目标权值为狗牙根>高羊茅>三叶草>薹白>紫苜蓿>早熟禾>白茅>小蓬草,故最终选取狗牙根、高羊茅和三叶草为适合本地区生态修复的草本植物。

2.3 灌木类优选

2.3.1 灌木植物层次结构模型 根据初次筛选的灌木植物的适应性、抗逆性、经济性、再生性、景观性五个因素建立灌木植物层次结构模型。

2.3.2 因素层单排序 权向量

$$\omega=(0.27360.41640.06750.15860.084)^T$$

2.3.3 方案层单排序 将方案层中的灌木植物进行因素对比,以适应性为例,打分情况如表 6 所示,将表 6 形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=7.08$,特征向量归一化得:

$$\omega_{11}=(0.1391\ 0.2711\ 0.2344\ 0.0569\ 0.2344\ 0.0306\ 0.0335)^T$$

表 6 灌木适应性判断矩阵

	多花 木兰	胡 枝子	盐 肤木	紫 穗槐	悬 钩子	高 梁泡	野 花椒
多花木兰	1	1/3	1/2	3	1/2	6	5
胡枝子	3	1	1	5	1	8	7
盐肤木	2	1	1	4	1	7	6
紫穗槐	1/3	1/5	1/4	1	1/4	2	2
悬钩子	2	1	1	4	1	7	6
高粱泡	1/6	1/8	1/7	1/2	1/7	1	1
野花椒	1/5	1/7	1/6	1/2	1/6	1	1

将表 6 形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=7.08$,特征向量归一化得:

$$\omega_{11}=(0.1391\ 0.2711\ 0.2344\ 0.0569\ 0.2344\ 0.0306\ 0.0335)^T$$
$$CI=0.013,CR=0.01<0.1$$
 满足一次性检验。

对方案层中的各灌木植物根据植物自有属性对其他因素进行对比,按照表 1 的打分原则,两两比较打分后形成矩阵并求得权向量如下。

方案层对比于因素层 B2(抗逆性):
$$\omega_{12} = (0.2865 \ 0.2865 \ 0.1423 \ 0.1208 \ 0.0573 \ 0.0468 \ 0.0598)^T$$
 $CI=0.041, CR=0.03<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B3(经济性):
$$\omega_{13} = (0.1438 \ 0.3886 \ 0.085 \ 0.2269 \ 0.0386 \ 0.0585 \ 0.0585)^T$$
 $CI=0.027, CR=0.02<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B4(再生能力):
$$\omega_{14} = (0.1172 \ 0.199 \ 0.3084 \ 0.0692 \ 0.0285 \ 0.0313 \ 0.2464)^T$$
 $CI=0.03, CR=0.02<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B5(景观功能):
$$\omega_{15} = (0.1318 \ 0.0714 \ 0.2461 \ 0.3937 \ 0.0394 \ 0.0445 \ 0.0732)^T$$
 $CI=0.013, CR=0.01<0.1$ 满足一次性检验。

2.3.4 灌木植物总排序 根据公式(4)得出方案层(C)目标权值:

$$\omega = (0.1967 \ 0.2573 \ 0.1987 \ 0.1252 \ 0.0984 \ 0.4051 \ 0.0832)^T$$
目标权值为胡枝子>盐肤木>多花木兰>紫穗槐>悬钩子>高粱泡>野花椒,故最终推荐胡枝子、盐肤木和多花木兰为适合本地区生态修复的灌木植物。

3 结论

采用 AHP 层次分析法,在实地调研与文献查阅的基础上建立了风电场区生态修复层次分析模型,从适应性、抗逆性、再生性、经济性以及景观性对初步选出的 22 种植物打分并形成判断矩阵,根据判断矩阵的权向量对植物的筛选进行了半定量的分析,为风电场区边坡生态修复植物的选择提供支撑。最终优选出 9 种植物适合风电场区生态修复,分别是乔木类属植物构树、侧柏、松树;草本类属植物狗牙根、高羊茅、三叶草;灌木类属植物胡枝子、盐肤木、多花木兰。

层次分析法不仅能较客观地对多指标进行综合评价,与其他评价方法相比,层次分析法的评价指标之间具有更高的区分度,但其在权重赋值、植物得分方面具有一定的主观性和片面性,得分情况没有结合试验数据,因此在后续的研究中应根据具体的地理环境条件,将理论与实践相结合,对植物进行更合理的权重赋值。植被恢复是一个长期的过程,需要对这一过程从恢复机理、恢复技术、恢复效果的角度给予科学的解释,并且对植被恢复效果做长期观测与研究。

[参 考 文 献]

[1] 汪鑫.风电场的建设对环境影响分析[J].湖北农机化, 2019(10):12-13.

[2] 黄金岩.风电场建设项目生态环境影响及保护对策[J]. 低碳技术, 2017(12):113-114.

[3] 张文静.风电场选址探究[J].湖北农机化, 2019(13): 82-83.

[4] 柴亚凡,马金珠,周波,等.戈壁荒漠区风电场建设对水土流失的影响[J].水土保持通报, 2014, 34(2): 124-127.

[5] 王森,杨月梅,曹艳芳,等.风电场建设对区域环境影响及生态修复对策探究[J].科技创新与应用, 2017(6): 178-179.

[6] 毕娜,浅谈铁岭地区风电场生态修复技术要求[J]. 环境保护与循环经济, 2014, 34(11):54-55,66.

[7] Xu Kang, He Lingchao, Hu Hanjian, et al. Positive ecological effects of wind farms on vegetation in China's Gobi desert[J]. Scientific reports, 2019, 9(1):1-11.

[8] 刘浩军,杨卫斌,胡蒋霞.绿色发展当典范——江西永丰风电场修复[J].国土绿化, 2018(9):66-69.

[9] 刘胜,顾小华.云南风电建设区生态修复区划及对策研究[J].环境与可持续发展, 2017(1):122-125.

[10] 黄元贞,刘海平,马良,等.基于层次分析法评价 12 种虾脊兰属植物的观赏性和生长适应性[J].福建农业大学学报, 2018, 47(6):667-672.

[11] 王月,李东亮.基于层次分析法的采石场生态恢复植物选择[J].河北工程大学学报, 2013, 30(3):96-99.

[12] 段军,梁智广.基于模糊层次分析法的采矿方法优选[J].化工矿物与加工, 2017(12):53-56.

[13] 汪绿培,陈新新.基于模糊层次-主成分分析法的河道生态护坡综合评价[J].水利科技与经济, 2018, 24(8): 38-42.

[14] Amine Belhadi, Fatima Ezahra Touriki, Said Elfezazi. Evaluation of critical success factors (CSFs) to lean implementation in SMEs using AHP [J]. International Journal of Lean Six Sigma, 2019:803-829.

[15] 常建娥,蒋太立.层次分析法确定权重的研究[J].武汉理工大学学报. 2017, 29(1):153-156.

[16] 张吉军.模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学, 2000, 14(2):80-88.

[17] Amanda Lange Salvia, Luciana Londero Brandli, Walter Leal Filho, et al. An analysis of the applications of Analytic Hierarchy Process (AHP) for selection of energy efficiency practices in public lighting in a sample of Brazilian cities[J]. Energy Policy, 2019, 132:854-864.

[18] Bilal Kilic, Caglar Ucler. Stress among ab-initio pilots: A model of contributing factors by AHP[J]. Journal of Air Transport Management, 2019, 80:425-436.

[19] 米勇,米秋菊,王洁,等.坝上地区风电场水土保持植物措施筛选研究[J].海河水利, 2019(3):24-26.

Optimization of Plants for Ecological Restoration of Wind Farm Slope Based on Analytic Hierarchy Process

WANG Hanwen¹, YANG Zhiyong^{1,2}, WAN Juan^{1,2}, LI Zhun¹

(1 School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;
2 Hubei Eco-Road Engineering Research Center, Wuhan 430000, China)

Abstract: To repair bare slope in wind farm area and guarantee the green development of wind farm, according to the principle of ecological restoration, and combined with various characteristics of plants, the optimization of ecological restoration plants is carried out. 22 species of primary screening plants are first determined according to the results of field investigation, and then the hierarchical chart of plant optimization is constructed by using the analytic hierarchy process. Then, the weights of adaptability, resistance, economy, regeneration and landscape are sorted, and the target weights are obtained according to the weights of factor layers. Finally, the high-quality plants suitable for the ecological restoration of the region are selected on this basis. The results show that there are nine high quality plants suitable for restoration in this area: Cynodon dactylon, festuca arundinacea and Oxalis which belong to herbaceous plants; Lespedeza bicolor, Rhus chinensis and Magnolia multiflora which belong to shrub; Broussonetia papyrifera, platycladus orientalis and pines which belong to tree. The research results can provide reference for ecological restoration of slope in wind farm area. In the follow-up study, we can combine theory with practice according to the specific geographical environment conditions, and assign more reasonable weights to plants. Long-term observation and research are needed for the effect of vegetation restoration.

Keywords: ecological restoration; wind farm; analytic hierarchy process; screening; high quality plant

[责任编辑：裴 琴]

(上接第 19 页)

Design of LCL Grid Connected Inverter based on Single Closed Loop Control and Multiple PR Controllers

PAN Jian, LIANG Jiacheng, CHEN Fengjiao, LI Kun, LI Jiacheng

(Hubei Key Laboratory of Solar Energy Efficient Utilization and Storage Operation Control ,
School of Electrical and Electronic Engineering , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problem of resonance peak of LCL inverter and its influence on grid connected power quality, the current feedback algorithm of superposition of proportional capacitor current and grid connected current is adopted to eliminate the influence of inherent resonance peak of LCL inverter. Several resonance rings are added on the basis of proportional resonance controller to restrain low-frequency harmonic and resonant current content of grid connected current, so as to improve the current to grid Accuracy of control and stability of grid connected system. Finally, the LCL filter parameters of 2kW grid connected inverter are designed, and the feasibility of the control algorithm is verified by the simulation and experiment platform on MATLAB/SIMLINK.

Keywords: LCL inverter; single current loop feedback; multiple proportional resonance controller

[责任编辑：张岩芳]