

计及电力电子变压器的交直流混合配电网能效评估

洪 澜, 彭勇刚, 李 悦, 年 珩, 韦 巍

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在交直流混合配电网能效评估的研究基础上,依据国家相关标准和参考文献,建立了一套计及电力电子变压器的交直流混合配电网的能效评估体系,整套指标体系包括了交直流混合配电网中的中压配电网、配电变压器和电力电子变压器、低压直流配电网和低压交流配电网4个部分,并结合四个模块各自的静态指标、动态指标和能效指标三个方面进行整体评估。采用熵权法和G-1法从客观和主观两个角度确定各项指标权重,同时结合指标状态值,得出配电网的综合能效分值,从直观角度协助交直流混合配电网能效水平提升。结合三个模拟算例,运用建立的指标体系进行评估,评估结果与实际能效情况一致,验证了评估指标的正确性和评估方法的有效性。

关键词: 能效评估; 交直流混合配电网; 电力电子变压器; 主客观权重

DOI: 10.12067/ATEEE1806019 **文章编号:** 1003-3076(2019)02-0072-08 **中图分类号:** TM71

1 引言

当今社会对于能源的需求日益提升,然而世界能源总量却逐步下降。中国目前的能源效率仅为33%,能耗强度更是发达国家的3~5倍^[1]。电网的能量浪费是整体能源损耗中很严重的一部分,根据相关资料,电能损耗约占总发电量的28%~33%^[2],造成了很严重的能量浪费。提高能源利用效率,减少电网的能量浪费是目前亟待解决的问题。而在电网的能量损耗中,配电网的损耗占了很大的比重,因此很有必要展开关于配电网的节能降损的相关研究。

与此同时,传统的交流配电网面临线损高、电能质量不稳定等一系列问题^[3],难以满足目前智能电网以及用户对于高质量电能的实际需求。为了解决这些问题,直流供电技术逐步发展起来,直流供电的出现很好地解决了谐波、三相不平衡等电能质量问题,改善了用户的用电体验,并且直流供电还能够提高能源的利用效率以及电网运行的稳定性,使得直流电源可以直接在直流配电网侧进行供电,降低了传统交流配电网的换流损耗。目前的研究趋势即是在交流配电网的基础上辅以直流配电网,构建交直

流混合配电网,充分利用交流、直流配电网的各自优势减少电能损耗。虽然直流供电优势明显,但是由于直流环节的加入,提高了各类分布式电源的占比,引入了新型的能效评估因子,并且带来了交流侧与直流侧的变流连接的问题^[4]。对此,电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)的出现将会很好地解决这个问题。目前,电力电子变压器由于受到相应器件的成本限制,产业化仍然需要一段时间,但是综合考虑电力电子变压器的各种优势,产业化应用是未来的趋势。同时,由于直流环节的出现,分布式电源的使用比例的日益提高,并且新型电力电子器件的引入,将会对配电网的能效产生新的影响。从而,开展计及电力电子变压器的交直流混合配电网的能效评估的研究很有必要^[5]。

目前,对于交流配电网的能效评估研究已经较为成熟,但是在交直流混合配电网的能效评估方面的研究却较为缺乏。文献[6]建立了交直流配电网技术经济评价指标体系,但未考虑交直流混合配电网结构和设备对能效的影响。文献[7]虽然提出了系统的损耗评估指标,但是并没有将能源效率指标考虑到整体的评估体系中,因而也缺乏一定的完整性。文献[8]虽然提出了直流配电网的能效评估体

收稿日期: 2018-07-23
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903300)
作者简介: 洪 澜(1995-),女,安徽籍,硕士研究生,研究方向为电网能效评估;
彭勇刚(1978-),男,湖北籍,教授,博导,研究方向为智能控制、智能电网与进化优化。

系,但是指标选取不够全面。文献[9]较为系统地提出了交直流混合系统的能效评价指标,但是没有考虑电力电子变压器的影响,同时未将能源的利用效率考虑在整个指标体系内。

结合上述分析,笔者提出了计及电力电子变压器的交直流混合配电网评估指标,采用主客观权重相结合的能效评估方法,综合配电网中动态、静态、能耗三个模块对配电网进行能效评估。同时结合改进的三个具体算例,验证所提出的的评估方法和评估指标。

2 指标分析

2.1 指标体系构建

依据层次分析法的思想,将配电网指标体系的指标层分为: $O=\{\text{配电网能效水平}\}$, $A=\{\text{中压配电网,配电变压器及电力电子变压器,低压直流配电网,低压交流配电网}\}$, $B=\{\text{静态指标,动态指标,能效指标}\}$,以及包含各单项指标的 P 层。针对 P 层中的单项指标,按照其对配电能效水平的影响,又将其分成正向指标和逆向指标。即若单项指标和能效水平呈正相关,则为正向指标,如分布式电源占比,储能充放电效率。反之则为逆向指标,如电流谐波畸变率,三相不平衡度等。

参考国家相关标准及相关文献[6-11]建立交直流混合配电网的能效指标体系如图 1 所示。

2.2 指标体系说明

交直流混合配电网中的中压配电网、配电变压器及电力电子变压器、低压直流配电网和低压交流配电网可以从宏观角度反映配电网的能效水平,因此将其作为 A 层指标的 4 个部分。同时,由于配电网的能效和静态设备参数及其对应的运行状况紧密相关,所以 B 层指标分别为对应的静态、动态、能效参数。

建立的指标体系中,主要的创新点在于电力电子变压器相关指标,能效指标以及分布式电源指标的引入。考虑到日后电力电子变压器迅猛的发展趋势,在此次的指标体系中,将 PET 的安装规范性、PET 接入容量占比等相关指标计入评估指标体系内。因而在 A 层的 4 个部分中,不是简单地考虑普通配电变压器的能效指标,而是将电力电子变压器的指标共同计入其中,如图 1 所示,提高了交直流混合配电网评估指标的完整性,并且对于日后含有 PET 的交直流混合配电网的能效评估具有参考意义。

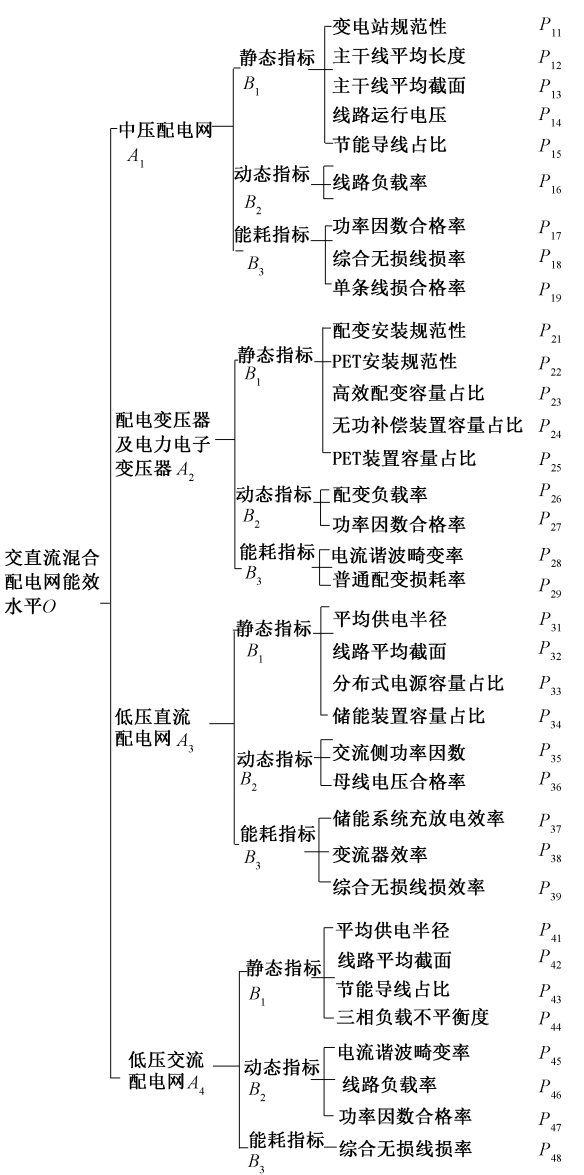


图 1 交直流混合配电网指标体系

Fig. 1 AC-DC hybrid distribution network index system

在 B 层指标部分,目前的很多参考文献仅考虑了配电网的损耗指标,或者只将配电网的静态和动态指标列入其中,并未将能效指标纳入评估体系内。对此,笔者将能效指标作为 B 层中与静态和动态指标并列的重要指标参数,将储能系统充放电效率,光伏效率,风机效率,变流器效率等重要的效率指标计入整体的能效评估指标体系中,进而可以更为全面地对交直流配电网进行能效评估,而不是只停留在能量的损耗部分。

同时随着分布式电源的占比的日益提高,在交直流混合配电网的能效评估中,分布式电源的能效指标也日益重要。因此在建立的能效评估指标中,

将分布式电源容量占比,储能装置容量占比,储能装置充放电效率等分布式电源的系列指标计入其中,保证了交直流混合配电网评估指标的完整性。

3 改进的综合评估模型

目前众多的评估模型中,多数采用层次分析法进行评估指标的权重计算,方法虽然较为简单,但是若评估指标较多,判断矩阵计算量随之成倍增长,并且需要对构造的判断矩阵进行一致性检验,当检验未通过,还需调整判断矩阵,计算复杂度较高且步骤较为繁琐^[9]。

针对交直流混合配电网中评估指标较多的特点^[11],笔者提出了结合熵权法和 G-1 法相结合的方法,从主观和客观的角度确定指标权重,保证指标权重的合理性。

3.1 原始数据规范化

依据灰色关联法,对原始数据进行规范化处理^[12]。首先选取指标基准值,若为样本指标中的正向指标,则选取不同样本中的最大值,反之则选取样本中的最小值。运用式(1)对不同样本的三级单项指标规范化处理,得到 4 个部分对应的规范化矩阵 E 。

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0 - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0 - x_i(k)|}{|x_0 - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0 - x_i(k)|}$$

(1)

式中, x_0 为指标基准值; $x_i(k)$ 为指标原始值, $i = 1, 2, 3, \dots, m, k = 1, 2, 3, \dots, n$, 其中 m 为总方案数, n 为指标总数; ζ 为分辨系数,一般为 0.5。

3.2 求取指标状态值

指标状态值为指标原始值与对应基准值的比值^[13]。其又根据正向和逆向指标的不同,分成两种求取方式。

若为正向指标,指标状态值为:

$$s_{\text{state}} = \frac{s_{\text{original}}}{s_{\text{base}}} \times 100$$

(2)

若为逆向指标,指标状态值为:

$$s_{\text{state}} = \frac{s_{\text{base}}}{s_{\text{original}}} \times 100$$

(3)

式中, s_{original} 为指标原始值; s_{base} 为指标基准值; s_{state} 为指标状态值。

3.3 指标权重确定

3.3.1 熵权法确定客观权重

熵值可以用来衡量系统的无序程度,量化决策

者的主观信息^[6],基于熵理论,可以计算出指标体系中 4 个部分每一个单项指标的相对优异行,进而对评价指标进行量化,计算得出指标的客观权重。主要步骤如下:

(1) 评价指标归一化处理。

$$r_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}}$$

(4)

式中, i 为方案序号; j 为指标序号; z_{ij} 为单项指标值; r_{ij} 为归一化处理后的指标值。

(2) 计算每一项指标的对应的熵值 s_j 。

$$s_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}$$

(5)

(3) 根据熵值的大小对指标的重要性进行排序,熵值越小,指标越重要。

(4) 计算熵权法对应的指标权重 ω_j , 并以此作为 G-1 法指标重要性排序的依据。

$$\omega_j = \frac{1 - s_j}{n - \sum_{j=1}^n s_j}$$

(6)

3.3.2 G-1 法确定主观权重

因为层次分析法判断矩阵求取的复杂性,选取无需检验判断矩阵一致性 G-1 法确定各指标的主观权重^[14]。G-1 法的关键在于确定相邻指标间的重要程度,对所有评估指标进行排序关系唯一的重要性排序,排序表记为 X 。对应的 G-1 法比较尺度表如表 1 所示。

表 1 G-1 法比较尺度表

Tab. 1 G-1 method comparison scale

赋值	意义
1.0	x_{k-1} 与 x_k 相比,同样重要
1.2	x_{k-1} 与 x_k 相比, x_{k-1} 稍微重要
1.4	x_{k-1} 与 x_k 相比, x_{k-1} 较为重要
1.6	x_{k-1} 与 x_k 相比, x_{k-1} 强烈重要
1.8	x_{k-1} 与 x_k 相比, x_{k-1} 明显重要
1.1, 1.3, 1.5, 1.7	上述判断的中间值

基于上述比较尺度表,运用 r_k ,其赋值可以参考表 1,表 1 中判断的中间值是指介于原始判断之间的值。比如中间值 1.1 即表明:指标 x_{k-1} 与 x_k 相比,重要程度介于同样重要和稍微重要之间。

$$rk = \frac{p_{k-1}}{p_k} \quad k = 2, 3, \dots, n$$

(7)

结合专家经验,对 X 中相邻指标 x_{k-1} 与 x_k 的重要性进行评判,式(7)中 p_k 表示单项指标对应的权

重值。指标重要性排序表生成之后,运用式(8)和式(9)计算得到各指标的主观权重 ω'_j 。

$$\omega'_j=(1+\sum_{k=2}^n\prod_{j=k}^nr_i)^{-1}$$

(8)

$$\omega'_{j-1}=r_j\omega_j\quad j=n,n-1,\cdots,2$$

(9)

式中, ω_j 为客观权重; ω'_j 为主观权重。

3.3.3 综合赋权

结合 G-1 法主观赋权的先验知识,以及熵权法充分利用样本数据的优点,通过线性加权的方式得到指标的综合权重^[15],如式(10)所示:

$$\omega_{j_0}=\alpha\omega_j+(1-\alpha)\omega'_j$$

(10)

式中, α 为赋予客观权重的比例系数; ω_{j_0} 为最终的综合权重值。

3.4 评估分值

结合指标状态值矩阵 S 和权重矩阵 W ,得到最终配电网的综合分值。

$$V=WS$$

(11)

4 算例分析

为表明含有电力电子变压器的交直流混合配电网的优越性,验证指标的合理性以及评估方法的实用性。通过对文献[7-10]算例的改造,形成三个改进后的算例,分别为:①含有 PET 的交直流混合配电网 Z_1 ;②不含有 PET 的交直流混合配电网 Z_2 ;③不含有 PET 的交流配电网 Z_3 。

三个算例指标对应的原始值,状态值,基准值详见附表 1~附表 3。其中含有 PET 的交直流混合配电网的简化拓扑图如图 2 所示。基于本文的指标体系,运用所提出的评估方法对上述 3 个算例进行评估,并将评估结果同实际结果进行对比。其中, P 层指标的各项综合权重值如表 2 所示,三个算例对应的指标分值及综合分值如表 3,表 4 和表 5 所示。

表 2 P 层各指标综合权重

Tab. 2 P-level comprehensive weights of indicators

指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重
P_{11}	0.340	P_{21}	0.040	P_{31}	0.065	P_{41}	0.057
P_{12}	0.090	P_{22}	0.076	P_{32}	0.017	P_{42}	0.052
P_{13}	0.082	P_{23}	0.024	P_{33}	0.042	P_{43}	0.063
P_{14}	0.583	P_{24}	0.033	P_{34}	0.021	P_{44}	0.088
P_{15}	0.129	P_{25}	0.083	P_{35}	0.071	P_{45}	0.047
P_{16}	0.057	P_{26}	0.069	P_{36}	0.030	P_{46}	0.039
P_{17}	0.047	P_{27}	0.057	P_{37}	0.027	P_{47}	0.036
P_{18}	0.043	P_{28}	0.048	P_{38}	0.059	P_{48}	0.025
P_{19}	0.036	P_{29}	0.044	P_{39}	0.023		

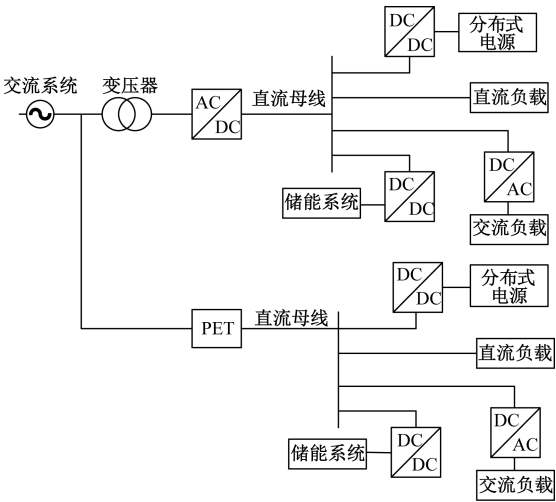


图 2 含 PET 交直流混合配电系统拓扑图

Fig. 2 Topology of PET-containing AC-DC hybrid power distribution systems

表 3 Z_1 区域配电网指标分值及综合分值

Tab. 3 Z_1 regional distribution network index scores and composite scores

O 层综合 分值	A 层指标		B 层指标	
	名称	分值	名称	分值
219.930	A_1	112.347	B_1	95.306
			B_2	3.823
			B_3	13.215
	A_2	44.368	B_1	22.770
			B_2	11.806
			B_3	9.792
	A_3	30.971	B_1	11.831
			B_2	8.856
			B_3	10.284
	A_4	32.243	B_1	16.146
			B_2	12.568
			B_3	3.530

通过对比表 3,表 4 和表 5 的综合分值结果,以及各指标分值的分析结果可知, Z_1 区域总分值最高, Z_2 区域由于缺少电力电子变压器的接入, Z_3 区域由于缺少低压直流配电网部分,分值都总体偏低。

经过指标分值的直观分析,可以明确地得出:含有电力电子变压器的交直流混合配电网 Z_1 的能效水平最高,因为若在交直流混合配电网中加入电力电子变压器,可以为整个配电网提供灵活的交流、直流接口,使得直流型分布式电源能够直接与电力电子变压器提供的直流接口相连,同时保证了直

表 4 Z₂ 区域配电网指标分值及综合分值
Tab. 4 Z₂ regional distribution network index
scores and composite scores

O 层综合 分值	A 层指标		B 层指标	
	名称	分值	名称	分值
209. 193	A ₁	115. 636	B ₁	98. 595
			B ₂	3. 826
			B ₃	13. 215
			B ₁	7. 903
	A ₂	29. 501	B ₂	11. 806
			B ₃	9. 791
			B ₁	10. 956
			B ₂	8. 856
	A ₃	30. 097	B ₃	10. 284
			B ₁	17. 863
			B ₂	12. 568
			B ₃	3. 530
	A ₄	33. 960	B ₂	12. 568
			B ₃	3. 530

流负荷能够在直流侧得到稳定的供电,减少交直流间的换流损耗,提高分布式电源的能源利用效率。而在分析 Z₂ 与 Z₃ 的分值结果中,可以发现,Z₂ 由于缺少电力电子变压器部分的接入,A₂ 部分的分值明显低于 Z₁ 区域,而 Z₃ 区域由于缺少低压直流配电网部分,综合分值明显偏低。因此,上述三个算例分析的结果很好地验证了含有电力电子变压器的交直流混合配电网的优越性。

附录

附表 1 Z₁ 区域配电网指标原始值,基准值,状态值

App. Tab. 1 Index original value, reference value, status value of Z ₁ regional distribution network									
P 层指标		实际值	基准值	状态值	P 层指标		实际值	基准值	状态值
中压 配电网	P ₁₁	9. 000	10. 000	90. 000	配电变压器 及电力电子 变压器	P ₂₁	9. 000	10. 000	90. 000
	P ₁₂	0. 500	0. 930	53. 763		P ₂₂	9. 000	10. 000	90. 000
	P ₁₃	8. 000	7. 200	90. 000		P ₂₃	0. 1897	0. 300	63. 218
	P ₁₄	10. 000	9. 000	90. 000		P ₂₄	4. 500	5. 000	90. 000
	P ₁₅	0. 000	0. 300	0. 000		P ₂₅	0. 190	0. 200	95. 000
	P ₁₆	0. 600	0. 890	67. 416		P ₂₆	0. 750	0. 800	93. 750
	P ₁₇	0. 680	0. 900	75. 556		P ₂₇	0. 8365	0. 900	92. 944
	P ₁₈	0. 058	0. 080	137. 931		P ₂₈	2. 400	3. 500	145. 833
	P ₁₉	0. 820	0. 850	10. 3659		P ₂₉	0. 031	0. 020	64. 516
	P ₃₁	0. 320	0. 350	91. 429	低压交流 配电网	P ₄₁	0. 320	0. 200	62. 500
低压直流 配电网	P ₃₂	150	250	62. 500		P ₄₂	120	200	60. 000
	P ₃₃	0. 165	0. 200	82. 500		P ₄₃	0. 000	0. 300	0. 000
	P ₃₄	0. 176	0. 250	70. 400		P ₄₄	2. 800	3. 000	107. 143
	P ₃₅	0. 820	0. 900	91. 111		P ₄₅	2. 300	3. 500	152. 174
	P ₃₆	0. 080	0. 100	80. 000		P ₄₆	0. 600	0. 890	67. 416
	P ₃₇	0. 800	1. 000	80. 000		P ₄₇	0. 680	0. 900	75. 556
	P ₃₈	0. 680	0. 800	85. 000		P ₄₈	0. 058	0. 080	137. 931
	P ₃₉	0. 058	0. 080	137. 931					

表 5 Z₃ 区域配电网指标分值及综合分值
Tab. 5 Z₃ regional distribution network index
scores and composite scores

O 层综合 分值	A 层指标		B 层指标	
	名称	分值	名称	分值
176. 626	A ₁	113. 994	B ₁	96. 953
			B ₂	3. 826
			B ₃	13. 215
			B ₁	7. 783
	A ₂	29. 381	B ₂	11. 806
			B ₃	9. 792
			B ₁	0. 000
			B ₂	0. 000
	A ₃	0. 000	B ₃	0. 000
			B ₁	17. 153
			B ₂	12. 568
			B ₃	3. 53
	A ₄	33. 251	B ₂	12. 568
			B ₃	3. 53

5 结论

通过上述算例指标以及综合分值的比较分析可知,评估结果符合理论分析结果,同时验证了含有电力电子变压器的交直流混合配电网的优越性,并且进一步验证了所提出的指标体系的合理性,以及评估方法的有效性,为日后含有电力电子变压器的交直流混合配电网的能效水平评估提供了参考。

附表 2 Z₂ 区域配电网指标原始值,基准值,状态值

App. Tab. 2 Index original value, reference value, status value of Z₂ regional distribution network

	<i>P</i> 层指标	实际值	基准值	状态值		<i>P</i> 层指标	实际值	基准值	状态值
中压配电网	<i>P</i> ₁₁	8.000	10.000	80.000	配电变压器 及电力电子 变压器	<i>P</i> ₂₁	8.500	10.000	85.000
	<i>P</i> ₁₂	0.300	0.930	32.258		<i>P</i> ₂₂	0.000	10.000	0.000
	<i>P</i> ₁₃	8.000	7.200	90.000		<i>P</i> ₂₃	0.200	0.300	66.667
	<i>P</i> ₁₄	10.000	9.000	90.000		<i>P</i> ₂₄	4.500	5.000	90.000
	<i>P</i> ₁₅	0.150	0.300	66.667		<i>P</i> ₂₅	0.000	0.200	0.000
	<i>P</i> ₁₆	0.600	0.890	67.416		<i>P</i> ₂₆	0.750	0.800	93.750
	<i>P</i> ₁₇	0.680	0.900	75.556		<i>P</i> ₂₇	0.8365	0.900	92.944
	<i>P</i> ₁₈	0.058	0.080	137.931		<i>P</i> ₂₈	2.400	3.500	145.833
	<i>P</i> ₁₉	0.820	0.850	10.3659		<i>P</i> ₂₉	0.031	0.020	64.516
低压直流 配电网	<i>P</i> ₃₁	0.300	0.350	85.714	低压交流 配电网	<i>P</i> ₄₁	0.280	0.200	71.429
	<i>P</i> ₃₂	120.000	250.000	48.000		<i>P</i> ₄₂	105	200	52.500
	<i>P</i> ₃₃	0.155	0.200	77.500		<i>P</i> ₄₃	0.120	0.300	40.000
	<i>P</i> ₃₄	0.165	0.250	66.000		<i>P</i> ₄₄	2.900	3.000	96.667
	<i>P</i> ₃₅	0.820	0.900	91.111		<i>P</i> ₄₅	2.300	3.500	152.174
	<i>P</i> ₃₆	0.080	0.100	80.000		<i>P</i> ₄₆	0.600	0.890	67.416
	<i>P</i> ₃₇	0.800	1.000	80.000		<i>P</i> ₄₇	0.680	0.900	75.556
	<i>P</i> ₃₈	0.680	0.800	85.000		<i>P</i> ₄₈	0.058	0.080	137.931
	<i>P</i> ₃₉	0.058	0.080	137.931					

附表 3 Z₃ 区域配电网指标原始值,基准值,状态值

App. Tab. 3 Index original value, reference value, status value of Z₃ regional distribution network

	<i>P</i> 层指标	实际值	基准值	状态值		<i>P</i> 层指标	实际值	基准值	状态值
中压配 电网	<i>P</i> ₁₁	8.500	10.000	85.000	配电变压器 及电力电子 变压器	<i>P</i> ₂₁	8.500	10.000	85.000
	<i>P</i> ₁₂	0.400	0.930	43.010		<i>P</i> ₂₂	0.000	10.000	0.000
	<i>P</i> ₁₃	8.000	7.200	90.000		<i>P</i> ₂₃	0.210	0.300	70.000
	<i>P</i> ₁₄	10.000	9.000	90.000		<i>P</i> ₂₄	4.500	5.000	90.000
	<i>P</i> ₁₅	0.100	0.300	33.333		<i>P</i> ₂₅	0.000	0.200	0.000
	<i>P</i> ₁₆	0.600	10.000	67.416		<i>P</i> ₂₆	0.700	0.800	0.875
	<i>P</i> ₁₇	0.680	0.930	75.556		<i>P</i> ₂₇	0.837	0.900	0.815
	<i>P</i> ₁₈	0.058	0.080	137.931		<i>P</i> ₂₈	2.600	3.500	0.929
	<i>P</i> ₁₉	0.820	0.850	10.3659		<i>P</i> ₂₉	0.015	0.020	1.346
低压直流 配电网	<i>P</i> ₃₁	0.000	0.350	0.000	低压交流 配电网	<i>P</i> ₄₁	0.300	0.200	66.667
	<i>P</i> ₃₂	0.000	250	0.000		<i>P</i> ₄₂	110	200	55.000
	<i>P</i> ₃₃	0.000	0.200	0.000		<i>P</i> ₄₃	0.100	0.300	33.333
	<i>P</i> ₃₄	0.000	0.250	0.000		<i>P</i> ₄₄	2.85	3.000	95.000
	<i>P</i> ₃₅	0.000	0.900	0.000		<i>P</i> ₄₅	2.300	0.200	152.174
	<i>P</i> ₃₆	0.000	0.100	0.000		<i>P</i> ₄₆	0.600	200	67.416
	<i>P</i> ₃₇	0.000	0.350	0.000		<i>P</i> ₄₇	0.680	0.300	75.556
	<i>P</i> ₃₈	0.000	250	0.000		<i>P</i> ₄₈	0.058	3.000	137.931
	<i>P</i> ₃₉	0.000	0.200	0.000					

参考文献 (References):

[1] 柳琴 (Liu Qin). 环境保护与建筑节能的相关性研究 (Research on the correlation between environmental protection and building energy conservation) [J]. 建筑节能 (Building Energy Efficiency), 2009, 37 (3): 56-58.

[2] 王涛 (Wang Tao). 电网企业降损节能研究 (Research on loss reduction and energy saving of power grid enterprises) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2009.

- jiang University), 2008.
- [3] Yang W H, Liu H, Wang Z, et al. Study on evaluation index system of equipment utilization on distribution network [A]. IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia [C]. 2012. 1-5.
- [4] Amin M, Arafat Y, Lundberg S, et al. Low voltage DC distribution system compared with 230 V AC [A]. IEEE Electrical Power and Energy Conference [C]. 2011. 340-345.
- [5] Gecan C O, Chindriş M, Pop G V. Aspects regarding dc distribution systems [J]. Analele Univerity din Oradea Fascicula de Energetica, 2009, (15): 226-231.
- [6] 郭玥, 张红斌, 杨卫红, 等 (Guo Yue, Zhang Hongbin, Yang Weihong, et al.). 交直流混合配电系统评价体系建设研究 (Study on evaluation system of AC-DC hybrid distribution system) [J]. 电气技术 (Electrical Technology), 2015, 16 (2): 49-52, 76.
- [7] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等 (Yang Xiaobin, Li Heming, Yin Zhongdong, et al.). 基于层次分析法的配电网能效指标体系 (Distribution network energy efficiency index system based on analytic hierarchy process) [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (21): 146-150, 195.
- [8] 尹忠东, 冯寅, 闫凤琴, 等 (Yin Zhongdong, Feng Yin, Yan Fengqin, et al.). 交直流混合配电网能效综合评价方法 (Comprehensive evaluation method for energy efficiency of AC/DC hybrid distribution network) [J]. 电力建设 (Power Construction), 2016, 37 (5): 100-108.
- [9] 冯寅 (Feng Yin). 优质电力园区电能质量治理的综合效益评估 (Comprehensive benefit evaluation of power quality control in high-quality electric parks) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.
- [10] 杨小彬 (Yang Xiaobin). 含超级电容混合储能装置的直流配电系统能效评估研究 (Energy efficiency evaluation of DC distribution system with supercapacitor hybrid energy storage device) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2014.
- [11] 肖峻, 崔艳妍, 王建民, 等 (Xiao Jun, Cui Yanyan, Wang Jianmin, et al.). 配电网规划的综合评价指标体系与方法 (Comprehensive evaluation index system and method for distribution network planning) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2008, 32 (15): 36-40.
- [12] 杜栋, 庞庆华, 吴炎 (Du Dong, Pang Qinghua, Wu Yan). 现代综合评价方法与案例精选 (Modern comprehensive evaluation methods and case selection) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2015.
- [13] 羌丁建, 寿挺, 朱铁铭, 等 (Qiang Dingjian, Shou Ting, Zhu Tieming, et al.). 高压配电网规划评价指标体系与综合评价模型 (High-voltage distribution network planning evaluation index system and comprehensive evaluation model) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2013, 41 (21): 52-57.
- [14] 涂春鸣, 肖凡, 兰征, 等 (Tu Chunming, Xiao Fan, Lan Zheng, et al.). 微电网中电力电子变压器的电压质量控制策略研究 (Research on voltage quality control strategy of power electronic transformer in microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 1-9.
- [15] 王丹, 田杰, 毛承雄, 等 (Wang Dan, Tian Jie, Mao Chengxiong, et al.). 智能电网中的电子电力变压器: 改善电力系统可控性 (Electronic power transformers in smart grids: improving power system controllability) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 21-33.

Energy efficiency evaluation of AC/DC hybrid distribution network considering power electronic transformers

HONG Lan, PENG Yong-gang, LI Yue, NIAN Heng, WEI Wei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: According to the research on the energy efficiency assessment of AC/DC hybrid distribution networks and based on relevant national standards and references, a set of energy efficiency evaluation systems for AC/DC hybrid distribution networks involving power electronic transformers has been established. The whole index system includes four parts, namely, medium-voltage distribution network, distribution transformer and power electronic transformer, low-voltage DC distribution network and low-voltage AC distribution network in the hybrid distribution

network. And we also include the static indicators, dynamic indicators and energy efficiency indicators into the assessment. The entropy weight method and G-1 method are used to determine the index weights from both objective and subjective views. Combined with the indicator status values, the comprehensive energy efficiency scores of the distribution network are obtained, which assists the AC/DC hybrid distribution network energy efficiency from an intuitive view. This paper combines three simulation examples and uses the established index system to evaluate the results. The assessment results are consistent with the actual energy efficiency situation, verifying the correctness of the assessment indicators and the effectiveness of the assessment methods.

Key words: energy efficiency evaluation; AC-DC hybrid distribution network; power electronic transformer; subjective and objective weights

《电工电能新技术》2018 年度刊登稿件统计结果

2018 年本刊共刊登 138 篇稿件,在此,编辑部全体同仁向一贯支持本刊工作的广大作者和审稿专家致以最衷心的感谢!

2018 年刊登稿件的第一作者单位共 44 个,感谢如下单位的支持,现将统计结果公布如下:

排序	第一作者单位	篇数	排序	第一作者单位	篇数	排序	第一作者单位	篇数
1	中国科学院电工研究所	23	15	华南理工大学	2	21	兰州理工大学	1
2	国家电网公司	12	15	南京航空航天大学	2	21	内蒙古科技大学	1
3	河北工业大学	11	15	清华大学	2	21	青岛大学	1
4	燕山大学	8	15	天津大学	2	21	山东大学	1
5	华北电力大学	7	15	中国矿业大学(北京)	2	21	上海宝准电源科技有限公司	1
5	武汉大学	7	21	北方工业大学	1	21	上海电力学院	1
7	福州大学	5	21	北京航空航天大学	1	21	上海交通大学	1
7	华中科技大学	5	21	北京航天发射技术研究所	1	21	上海理工大学	1
7	西南交通大学	5	21	东北大学	1	21	沈阳工业大学	1
10	东北电力大学	4	21	东南大学	1	21	西安电子科技大学	1
10	华东交通大学	4	21	福建工程学院	1	21	湘潭大学	1
10	辽宁工程技术大学	4	21	河北交通职业技术学院	1	21	浙江大学	1
10	南方电网公司	4	21	河海大学	1	21	中国电子科技集团公司第二十七研究所	1
14	三峡大学	3	21	江苏安全技术职业学院	1	21	中国科学院微电子研究所	1
15	湖南大学	2	21	兰州交通大学	1			

注:篇数相同按单位名称字母排序