大型风电场的电压波动与闪变预评估建模研究

由于目前尚无对未投入运行的大型风电场接入电网进行电压波动与闪变的预评估建模分析的文献，故设计了一种规范化的大型风电场接入电网的电压波动与闪变的预评估计算模型。首先，严格依据现行国家标准GB/T 20320—2013，深入解析大型风电场接入电网的电压波动与闪变的计算过程；在此基础上设计一种规范化的大型风电场接入电网的电压波动与闪变预评估计算模型。模型充分考虑风电机组连续运行和切换运行这两种工况，所需的计算数据只须从大型风电场设计方案和风机出厂测试资料中获取，无须现场实测数据，更适用于电压波动与闪变的预评估分析，是对现有文献的一种重要补充。最后，以广东省某正在建设中的大型风电场为例，验证了所设计模型的可行性。

欧阳森　梁伟斌／华南理工大学电力学院广东省绿色能源技术重点实验室

欧阳森／副研究员

关键词／Keywords
大型风电场·
电压波动与闪变·
建模·
预评估·

0　引言

目前，大型风电场发电容量与发电量占比日渐增长，大型风电场出力存在较强的随机性与波动性，会影响电网的电能质量。其中，电压波动与闪变是大型风电场对电网电能质量的重要负面影响之一，对电压波动与闪变的计算和评估展开深入研究具有重要的科研意义和工程应用价值[1-2]。

国内已逐步开展了一些对已建成的大型风电场接入电网的电压波动与闪变方面的研究工作。目前电压波动与闪变常用的模型包括并联电流源等效法[3]、平方检波法[4]、频域算法[5-6]和IEC闪变仪[7]等，但这些模型只能计算连续运行工况下的电压波动与闪变，没有考虑到切换运行工况[8]。文献[3]将时变动态向量理论应用于电压波动与闪变计算，其将切换运行工况也考虑在内，但是仍需要通过对投运后的实测电流波形进行分析才可得出结果，不适合用于预评估分析。由于未建成的大型风电场对电网的电压波动与闪变影响评估（预评估）正逐渐面临着日益增多的需求。现有文献[9-14]面对预评估的需求仍存在一定的局限性。

其一，目前大部分文献都是针对投入运行后的大型风电场进行建模计算，其特点是需要现场实测风电机组或大型风电场输出电流，通过分析实测电流波形才能计算电压波动与闪变值。但对于尚未建成的大型风电场很难实现输出电流的实测，因此进行电能质量的预评估时，上述方法无论参数选取还是计算过程都需要进行根本性修改，故将上述方法应用于预评估分析仍存在一定的难度。

其二，根据最新国家标准GB/T 20320—2013《风力发电机组 电能质量测量和评估方法》[8]的要求，大型风电场的电压波动与闪变计算需要考虑风电机组在连续运行、切换运行两种工况条件，但目前大部分电压波动与闪变计算方法均只考虑了连续运行工况，而忽略了切换运行工况下的电压波动与闪变。实际上，切换运行所造成的电压波动与闪变比连续运行时严重得多[15]，尤其在风速不稳定时，风电机组切换运行造成的电压波动与闪变更不可忽视[16-17]。因此，对大型风电场电压波动与闪变进

国家自然科学基金资助项目（51377060）。

行分析时必须全面考虑连续运行和切换运行工况条件。

由于目前尚无针对未投入运行的大型风电场接入电网的电压波动与闪变预评估建模方面的文献，因此，有必要设计一种适用于预评估分析的大型风电场接入电网的电压波动与闪变计算模型，可以作为现有文献的重要补充。

本文首先深入解析了现行国家标准GB/T 20320—2013中的电压波动与闪变理论计算过程，充分考虑了连续运行、切换运行两种工况条件，并考虑闪变值的传递计算；同时，建立起涵盖风速条件、大型风电场参数及电网结构参数的计算参数体系，所需数据无须进行现场实测，使模型适用于预评估分析；其次，在国家标准和计算体系的基础上，设计一种大型风电场接入电网的电压波动与闪变的计算模型，该模型严格依据GB/T 20320—2013进行设计，具有规范化、分析全面和适用于预评估分析的特点。最后以广东省某正在建设中的大型风电场接入电网为例，展现完整的对电压波动与闪变预评估分析过程，验证所提模型的可行性。

1 大型风电场接入电网电压波动与闪变的计算分析

GB/T 20320—2013适用于风轮扫掠面积大于或等于40 m^2的并网型风力发电机，大型风电场的并网型风力发电机的风轮扫掠面积都大于40 m^2，故国标中的计算方法普遍适用于大型风电场接入电网。

GB/T 20320—2013对大型风电场引起的电压波动与闪变的规定，需要考虑风电机组连续工作和切换工作工况，衡量闪变的指标有长时间闪变值和短时间闪变值，衡量电压波动的指标有相对电压波动值。本文方法对现有的大部分方法尚未考虑切换运行工况的问题进行了改进，以下分别对风电机组两种工况进行分析。

1.1 连续运行

在连续运行的单台风电机组并网条件下的长时间闪变值和短时间闪变值的计算方法如下

$$P_{st}=P_{lt}=c(\Psi_k,v_a)\frac{S_n}{S_k} \tag{1}$$

式中，P_{st}为短时间闪变值；P_{lt}为长时间闪变值，$c(\Psi_k, v_a)$为闪变系数；Ψ_k为电网连接点的电网阻抗角；v_a为风电机组的年平均风速；S_n为风电机组的额定视在功率；S_k为电网连接点的短路视在功率。

需要说明的是，闪变系数$c(\Psi_k, v_a)$和连接点的电网阻抗角Ψ_k和年平均风速v_a有关，根据不同的风电机组会有不同的闪变系数表。

连续运行的情况下多台风电机组并入电网，则闪变值按照下式来计算

$$P_{st\Sigma}=P_{lt\Sigma}=\frac{1}{S_k}\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}}[c(\Psi_k,v_a)\cdot S_{n,i}]^2} \tag{2}$$

式中，$S_{n,i}$为第i台风电机组的额定视在功率；N_{wt}为并网的风电机组的台数。

1.2 切换运行

风电机组的切换运行一般来讲包括三种情况：①风电机组在切入风速时起动；②在额定风速时起动；③发电机在最恶劣工况下的切换。因第三种情况出现的概率很小且计算很复杂，故本文在计算的时候只考虑前两种情况。

单台风电机组短时间闪变值计算公式为

$$P_{st\Sigma}=\frac{18}{S_k}\left\{\sum_{i=1}^{N_{wt}}N_{10,i}[k_{f,i}(\Psi_k)\cdot S_{n,i}]^{3.2}\right\}^{0.31} \tag{3}$$

单台风电机组长时间闪变值计算公式为

$$P_{lt\Sigma}=\frac{8}{S_k}\left\{\sum_{i=1}^{N_{wt}}N_{120,i}[k_{f,i}(\Psi_k)\cdot S_{n,i}]^{3.2}\right\}^{0.31} \tag{4}$$

式中，$k_f(\Psi_k)$为闪变阶跃系数，与电网连接点处的电网阻抗角Ψ_k相关，也需要根据风电机组的闪变系数表中的数值按照插值法求出；$N_{10,i}$和$N_{120,i}$分别为各台机组在10 min和2 h内切换操作的最大次数。

风电机组在切换运行的过程中会引起电压波动。用d表示相对电压波动，则其计算公式为

$$d=100k_u(\Psi_k)\cdot\frac{S_n}{S_k} \tag{5}$$

式中，$k_u(\Psi_k)$为电压波动系数，与风电机组接入电网的电网阻抗角相关，同样需要从闪变系数表中按照线性插值法求出。

对于电网连接点上如果接入多台风电机组，由于同一时间不可能有两台及以上的风电机组进行切换运行。因此在计算多台机组引起的电压波动值的时候不需要考虑累积影响。

1.3 闪变值的传递计算

依据电压波动与闪变GB/T 12326—2008[8]可知，按照前述计算方法只能计算出风电机组接入系统的公共连接点PCC的闪变值，然而，在实际的评估计算中需要计算其他中间连接点的闪变值（如大型风电场并网点的闪变值），为此需要采取传递计算的办法来进行计算，如图1所示。

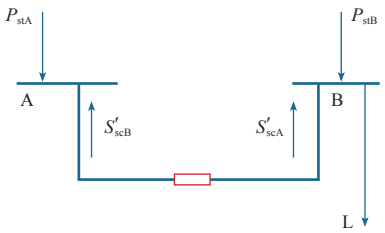

图1 电压闪变计算传递示意图

计算过程依照图1来解释说明：假设依据前述方法能够计算出B点的短时闪变值，要求A点的短时闪变值。则有

$$P_{stA} = T_{BA} P_{stB} \tag{6}$$

式中，P_{stB}为B点的短时闪变值；P_{stA}为A点处的短时闪变值，由B点传递过来。T_{BA}为B点到A点的闪变值传递系数。它的计算方法如下式所示

$$T_{BA} = \frac{S'_{scA}}{S_{scA} - S'_{scB}} \tag{7}$$

式中，S_{scA}为A点处的短路容量；S'_{scA}为B点处短路时A点流向B点的短路容量；S'_{scB}为A点处短路时B点流向A点的短路容量。

通过上式的传递计算，便可求出非风电机组的连接点处的电压闪变值。

2 计算模型设计

本文提出一种规范化的电压波动与闪变预评估的计算模型，设计步骤如下：首先对计算过程进行严谨的推导分析，统计并建立本模型的计算参数体系；其次，严格依据GB/T 20320—2013，全面考虑连续运行和切换运行工况条件，设计一种规范化的大型风电场接入电网的电压波动与闪变的预评估计算模型。

2.1 计算参数体系建立

对计算过程进行了严谨的推导分析后，建立的计算参数体系涵盖了风速条件、大型风电场参数和电网结构参数。每类所含参数如表1所示，中间变量参数如表2所示。表1中的参数均可从大型风电场设计方案和风机出厂测试资料中获取，表2中参数可从表1中推导而得。与现有模型相比，本模型无须再进行大型风电场输出电流实测，使得本模型更适用于尚未投入运行的大型风电场的电能质量预评估分析。

表1 大型风电场并网引起电压波动与闪变计算参数体系

影响因素	具体参数	参数符号
风速条件	对应轮毂高度的年平均风速/(m/s)	v_a
大型风电场参数	风电机组型式	T
	扫风面积/m^2	W
	风电机组数量/台	N_{wt}
	单台风电机组额定功率/MV·A	S_n
	轮毂高度/m	h
电网结构参数	并网点电压等级/kV	U_n
	大型风电场送出线路的阻抗/Ω	Z_L
	电网连接点（A点）处母线短路容量/MV·A	S_{scA}
	大型风电场连接点（B点）处母线短路容量/MV·A	S_k
	B点处短路时A点流向B点的短路容量/MV·A	S'_{scA}
	A点处短路时B点流向A点的短路容量/MV·A	S'_{scB}

表2 大型风电场并网引起电压波动与闪变计算中间变量符号

影响因素	具体参数	参数符号
大型风电场参数	电压波动系数	$k_u(\Psi_k)$
	闪变系数	$c(\Psi_k, v_a)$
	闪变阶跃系数	$k_f(\Psi_k)$
	10 min切换运行的最大次数/次	N_{10}
	2 h切换运行的最大次数/次	N_{120}
电网结构参数	电网阻抗相角(°)	Ψ_k

注：后文所提及的具体参数将用其参数符号代替。

2.2 模型设计

基于2.1中建立的计算参数体系，严格依据GB/T 20320—2013对大型风电场接入引起的电压波动与闪变计算进行建模设计，所设计的计算模型流程图如图2所示。

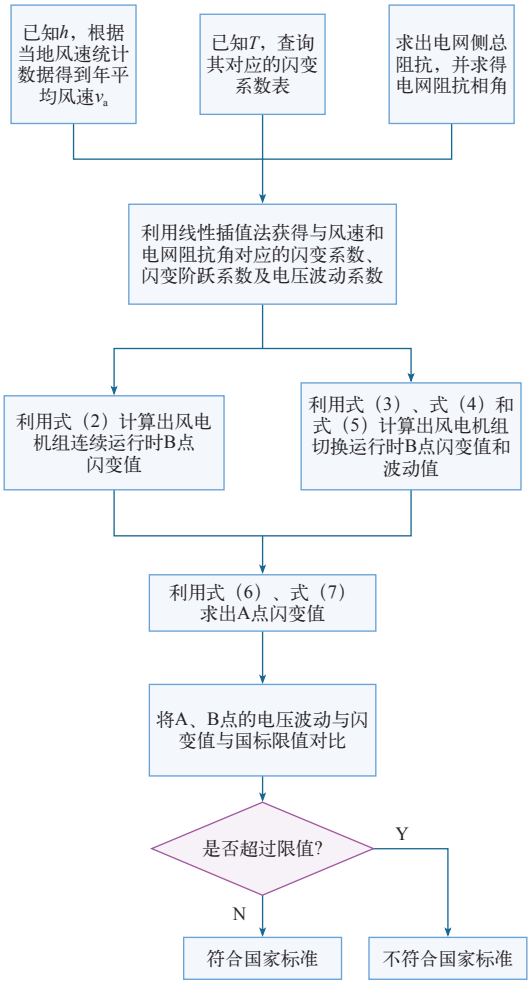

图2 计算模型流程图

计算模型对应的计算步骤如下。

1）收资得到h后，根据当地风速统计数据得到年平均风速v_a。

2）收资得到T后，查询风机的评测资料得该风电机组连续运行或切换运行时的闪变系数表，得到对应的$c(\Psi_k, v_a)$、$k_f(\Psi_k)$、$k_u(\Psi_k)$与Ψ_k、v_a的关系。

3）收资得到Z_L、S_{scA}后，通过$Z_n = U_n^2/S_{scA}$求出电网侧系统短路阻抗Z_n，通过$Z_{all} = Z_L + Z_n$求出电网侧总阻抗，并由Z_{all}的$\tan\Psi_k = X/R$得到Ψ_k。

4）求得Ψ_k、v_a后，查询步骤2）所得的闪变系数表，利用线性插值法获得与Ψ_k、v_a对应的$c(\Psi_k, v_a)$、$k_f(\Psi_k)$和$k_u(\Psi_k)$值。

5）收资得到S_n、S_k、N_{wt}与$c(\Psi_k, v_a)$后，利用式（2）计算出风电机组连续运行时B点的短时间电压闪变值P_{st}、长时间电压闪变值P_{lt}。

6）求得N_{wt}、$k_f(\Psi_k)$、$k_u(\Psi_k)$、S_n、S_k、N_{10}和N_{120}后，分别利用式（3）、式（4）和式（5）计算出风电机组切换运行时B点的短时间电压闪变值P_{st}、长时间电压闪变值P_{lt}和相对电压波动值d。

7）收资得到S_{scA}、S'_{scA}和S'_{scB}后，利用式（7）求得闪变值传递系数T_{BA}，并利用式（6）求得A点的闪变值。

8）判断U_n所在电压等级范围（LV、MV或HV），将步骤5）、步骤6）和步骤7）所得的闪变值和电压波动值，与文献[8]的国标限值对比，可判断A、B点的电压波动与闪变值是否符合国家标准：若闪变值和电压波动值超过相应国标限值，则不符合国家标准，反之则符合。

3 算例分析

本文以广东省某正在建设中的大型风电场接入电网为例，进行详细的电压波动与闪变预评估计算分析。该大型风电场项目安装33台1 500 kW风力发电机组，总装机容量为49.5 MW。33台风力发电机出口电压为690 V，通过箱式变压器升压至35 kV后接入系统，接入系统示意图如图3所示。

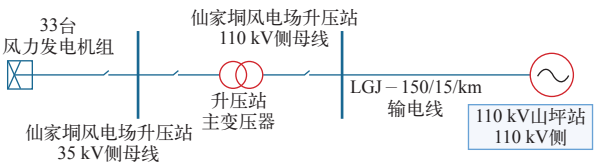

图3 广东省某大型风电场接入系统示意图

3.1 计算参数体系

参考表1中的计算参数体系，该大型风电场接入电网电压波动与闪变计算所需的参数如表3所示。

表3 广东省某大型风电场并网引起电压波动与闪变计算参数体系

参数符号	具体参数	参数符号	具体参数	参数符号	具体参数
v_a/(m/s)	6.9	S_n/MV·A	1.5	S_{scA}/MV·A	1 414
T	WTG1型	h/m	65	S_k/MV·A	1 195
W/m^2	4 654	U_n/kV	110	S'_{scA}/MV·A	1 195
N_{wt}/台	33	Z_L/Ω	3.15+j6.045	S'_{scB}	0

3.2 模型计算

该大型风电场的风电机组的扫风面积大于40 m^2，利用2.2节所设计的电压波动与闪变计算模型求得上述大型风电场接入引起电网侧的电压波动与闪变值，模型计算过程如下。

1）已知轮毂高度h=65 m，根据当地风速统计数据可知平均风速v_a=6.9 m/s。

2）已知风电机组为WTG1型，通过查找风机出厂测试资料得到其连续运行或切换运行时对应的$c(\Psi_k, v_a)$、$k_f(\Psi_k)$、$k_u(\Psi_k)$与Ψ_k及v_a的关系如表4和表5所示。

表4 风机连续运行时的闪变系数

v_a/(m/s)	Ψ_k(°)			
	30	50	70	85
6	3.33	3.41	3.22	2.94
7.5	3.33	3.41	3.22	2.94
8.5	3.33	3.41	3.22	2.94
10	3.33	3.4	3.22	2.94

表5 风机切换运行时的参数情况

内容	具体参数							
切换运行工况	在切入风速时起动				在额定风速时起动			
切换运行的最大次数N_{10}	10				4			
切换运行的最大次数N_{120}	120				48			
电网阻抗相角Ψ_k(°)	30	50	70	85	30	50	70	85
闪变阶跃系数$k_f(\Psi_k)$	0.4	0.33	0.32	0.34	1.79	0.36	0.82	0.4
电压波动系数$k_u(\Psi_k)$	0.28	0.24	0.19	0.16	0.29	0.22	0.19	0.19

3）通过$Z_n=U_n^2/S_{scA}$求得电网侧系统短路阻抗Z_n=8.56j（电阻很小，可忽略不计），故$Z_{all}=Z_L+Z_n$=3.15+14.605j，由Z_{all}的tan$\Psi_k=X/R$得到Ψ_k=78°。

4）已知Ψ_k=78°、v_a=6.9m/s，查询表4和表5，利用线性插值法求得连续运行时，$c(\Psi_k, v_a)$=3.05；切入风速切换运行时，$k_f(\Psi_k)$=0.33、$k_u(\Psi_k)$=0.17；额定风速切换运行时，$k_f(\Psi_k)$=0.54、$k_u(\Psi_k)$=0.19。

5）已知S_n、S_k和N_{wt}与$c(\Psi_k, v_a)$，利用式（2）计算出风电机组连续运行时B点的闪变值

$$P_{st}=P_{lt}=\frac{1}{1\,195}\sqrt{(3.05\times1.5)^2\times33}=0.022 \quad (8)$$

故B点短、长时间电压闪变值都为0.022。

6）利用式（3）、式（4）求得风电机组在切入风速切换运行时B点的短时间电压闪变值P_{st}=0.045，长时间电压闪变值P_{lt}=0.043；在额定风速切换运行时B点的短时间电压闪变值P_{st}=0.056，长时间电压闪变值P_{lt}=0.053。利用式（5）求得风电机组在切入风速切换运行时B点的相对电压波动值d=0.021；在额定风速切换运行时B点的相对电压波动值d=0.024。

7）利用式（7）求得T_{BA}=0.845，利用式（6）将B点闪变值转化为A点闪变值：①风电机组连续运行时A点的闪变值$P_{st}=P_{lt}$=0.018 6；②风电机组在切入风速切换运行时A点的短时间电压闪变值P_{st}=0.038，长时间电压闪变值P_{lt}=0.036，在额定风速切换运行时A点的短时间电压闪变值P_{st}=0.047，长时间电压闪变值P_{lt}=0.045。

8）将上述闪变值与波动值与文献[12]中的国家标准限值进行对比，对比结果如表6所示。

就本例而言，通过电压波动与闪变计算模型计算后，本大型风电场接入电网引起的A、B点的闪变值与波动值均符合国家标准。由表6可知，风电机组切换运行工况的闪变比连续运行时严重得多，论证了将切换运行工况考虑在内的必要性。

表6 电压波动与闪变值与国家标准对比结果

参数名			参数值	国标限值	是/否符合标准
大型风电场连接点（B点）	连续运行时	短时间闪变值	0.022	0.8	是
		长时间闪变值	0.022	0.6	是
	切入风速时切换	短时间闪变值	0.045	0.8	是
		长时间闪变值	0.043	0.6	是
		相对电压波动值	0.021	1	是
	额定风速时切换	短时间闪变值	0.056	0.8	是
		长时间闪变值	0.053	0.6	是
		相对电压波动值	0.024	1	是
电网连接点（A点）	连续运行时	短时间闪变值	0.018 6	0.8	是
		长时间闪变值	0.018 6	0.6	是
	切入风速时切换	短时间闪变值	0.038	0.8	是
		长时间闪变值	0.036	0.6	是
	额定风速时切换	短时间闪变值	0.047	0.8	是
		长时间闪变值	0.045	0.6	是

4 结束语

1）本文严格依据现行国家标准GB/T 20320—2013《风力发电机组 电能质量测量和评估方法》进行设计，形成了规范化的大型风电场的电压波动与闪变计算模型。

2）本文改进了现有模型难以用于预评估分析的缺陷，是对现有文献的一种重要补充。本模型计算所需的参数可从大型风电场设计方案和风机出厂测试资料中得到，无须再进行大型风电场输出电流实测，具有较强的实用性，尤其适用于尚未投入运行的大型风电场进行电压波动与闪变预评估分析。

3）本文更全面地分析了连续运行和切换运行工况条件下的大型风电场接入电网的电压波动与闪变状况。由于切换运行所造成的电压波动与闪变比连续运行时严重得多，尤其在风速不稳定时，风电机组切换运行造成的电压波动与闪变更不可忽视。因此，本文对大部分方法未考虑切换运行工况的问题进行了改进，全面考虑了风电机组在连续运行、切换运行两种工况条件的具体计算的全过程，并考虑了闪变值的传递计算，提高了电压波动与闪变分析的全面性。

4）本文以广东省某大型风电场接入电网为例，利用计算模型对其进行详细的电压波动与闪变计算分析，计算得到连续运行和切换运行工况条件下的波动值与闪变值，并与国家标准限值进行比较与评估。计算结果显示切换运行工况的电压闪变问题比连续运行工况严重得多，论证了将切换运行工况考虑在内的必要性，同时也验证了本模型用于大型风电场电压波动与闪变的预评估分析的可行性。

参考文献

[1] 吴琼．风电场对电网电能质量影响的研究 [D]．南昌：南昌大学，2008．

[2] 孙涛，王伟胜，戴慧珠，等．风力发电引起的电压波动和闪变 [J]．电网技术，2003 (12)：62-66，70．

[3] 赵海翔．风电引起的电压波动和闪变研究 [D]．北京：中国电力科学研究院，2005．

[4] 屠金玲．电压波动与闪变的检测和抑制 [D]．杭州：山东大学，2013．

[5] Amaris H，Vilar C，Usaola J，et al．Frequency domain analysis of flicker produced by wind energy conversions systems [C]．Athens：International Conference on Harmonics and Quality of Power，1998．

[6] Moreno V C，Duarte A H，Garcia U J．Propagation of flicker in electric power networks due to wind energy conversions systems [J]．IEEE Transactions on Energy Conversion，2002，17 (2)：267-272．

[7] GB/T 12326—2008 电能质量 电压波动和闪变 [S]．北京：中国标准出版社，2008．

[8] GB/T 20320—2013 风力发电机组电能质量测量和评估方法 [S]．北京：中国标准出版社，2013．

[9] 李渝，范高锋，李庆，等．达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响 [J]．电网技术，2007，31 (6)：88-92．

[10] 葛高飞．风电并网对电力系统电能质量的影响研究 [D]．合肥：合肥工业大学，2013．

[11] 白鸿斌，王瑞红．风电场并网对电网电能质量的影响分析 [J]．电力系统及其自动化学报，2012，24 (1)：120-124．

[12] 王振宇．风电接入对电网电能质量的影响分析 [J]．机电信息，2012 (21)：21-23．

[13] 刘薇．风电并网对电能质量影响的评估与治理 [D]．北京：北京交通大学，2014．

[14] 何世恩，郑伟，智勇，等．大规模集群风电接入电网电能质量问题探讨 [J]．电力系统保护与控制，2013 (2)：39-44．

[15] 杨洪耕，肖先勇，刘俊勇．电能质量问题的研究和技术进展 (四) ——电压波动与闪变的测量分析 [J]．电力自动化设备，2004，24 (1)：1-4．

[16] 雷亚洲．国外风力发电导则及动态模型简介 [J]．电网技术，2005，29 (12)：27-32．

[17] 沈小军，周冲成，吕洪．大型风电场风电机组分组方法研究综述 [J]．电气工程学报，2016，11(5)：1-10．

（收稿日期：2016－03－25）EA

(上接第43页)

③当编码不在已知的编码表中，找不到相应故障的类型。

3）三比值法只是变压器众多故障诊断方法中的一种，仅仅根据三比值法来诊断变压器的故障不够全面。在诊断变压器故障实际的应用中，应该进行综合诊断，才能得出正确的结论。应结合电气试验结果、检修情况、设备的结构特点、设备运行状况和家族性故障等因素以及考虑非故障原因形成的气体影响而进行综合诊断分析，才能对故障的位置及原因作出一个准确、有价值的诊断结果。

参考文献

[1] 国家电网公司人力资源部编组．国家电网公司生产技能人员职业能力培训专用教材 (油务化验) [M]．北京：中国电力出版社，2010．

[2] 康喜明，张惠芝，柴绍鹏．油色谱分析在变压器故障诊断中的应用 [J]．青海电力，2012，31 (3)：45-48．

[3] 程实，常青．浅谈电力变压器主要故障分析与诊断 [J]．贵州电力技术，2010，13 (9)：37-39．

[4] 陈志勇，李忠杰．油中溶解气体分析在变压器故障诊断中的应用 [J]．变压器，2011，48 (2)：64-66．

[5] 赵旭彤，沈倩，许家响，等．基于IEC三比值法与融合权重法的变压器可拓关联故障诊断 [J]．电网与清洁能源，2013，29 (8)：18-22．

[6] 李洪珠，孙佳月，马文涛，等．基于半桥变压器与次序耦合变压器的超级电容均压 [J]．电气工程学报，2015，10 (6)：41-46．

（收稿日期：2016－08－15）EA