

小电网负荷低谷时段谐波电压问题的研究

马志远^[1] 杨振龙^[1] 贺建闽^[2]

[1] 铁道第三勘察设计院集团有限公司电化电信处 300251 [2] 西南交通大学电气工程学院 610031

摘要: 本文对多个变电所实测数据进行了统计分析,总结了小电网在负荷低谷时段谐波电压的一些特征,并对影响变压器谐波电流的因素进行了仿真分析。

关键词: 小电网; 谐波; 负荷低谷时段; 变压器

Abstract: This paper carried on statistical analysis to the data of measurement on a lot of substations, has summarized some characteristics of the harmonic voltage on power networks valley period of load, and study the factors influencing the harmonic current of transformer.

Keywords: small power networks; harmonic; valley period of load ; transformer

0 引言

在电力系统中,各种谐波源产生的谐波影响着整个电力系统的电气环境,对电气设备的危害是严重的。随着电力电子等设备的迅速发展,谐波问题也越来越受到人们的重视。变压器是传统的谐波源之一,在正常情况下,其产生的谐波不大,但当变压器工作在一些特殊运行方式,如在夜间负荷低谷时段,电网运行电压偏高的情况下,变压器铁芯饱和程度增加,其产生的谐波电流急剧增大,由此反映的就是电网在负荷低谷时段谐波电压过高的现象,在小电网中尤为明显,已经大大超过了我国的谐波标准。因此,对小电网负荷低谷时段谐波电压过高问题的研究具有十分重要的意义。

1 牵引变电所测试数据分析

1.1 测试电网负荷背景情况

成都铁路局、西南交通大学和云南供电局于 2002 年 6 月在内昆线铁路试运行之前完成对铜鼓溪等牵引变电所进行测试,铜鼓溪牵引变电所隶属于云南昭通电网,处于云贵川三省交界处,属于薄弱的小电网。变电所进线电压为 110kV。记录当日铜鼓溪牵引变电所当日 0~9 时只有所内自用电,17~24 时并联电容器投运,这两个时段线路上没有列车取流。

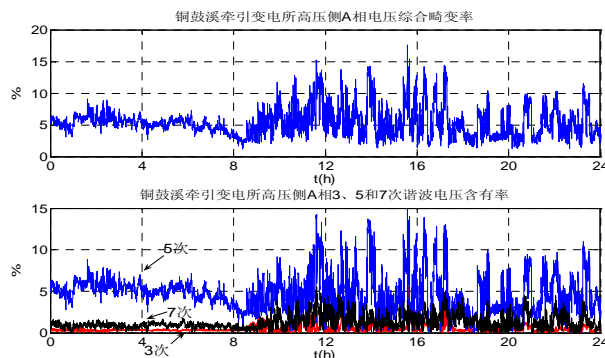
绥中北牵引变电所位于秦沈客运专线,在其正式开通之前,西南交通大学电气工程学院于 2002 年 9 月至 11 月对其进行多日测试,该所高压侧引入单相 220 kV 电源。其电网供电能力较好。记录当日只有 12~18 时有一列交-直-交型列车在试运行,其他时刻只有所内的的自用电。

1.2 数据分析

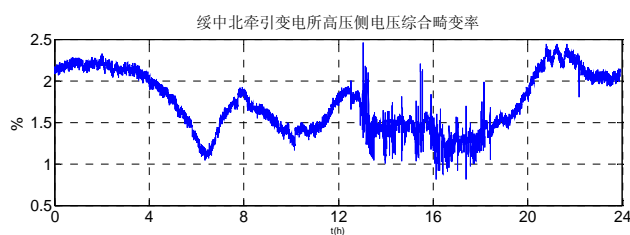
各个牵引变电所电压总谐波畸变率和各次谐波电压含有率趋势图如图 1,统计情况见表 1。

表 1 各个变电所 A 相电压总谐波畸变率和各次谐波电压含有率 95% 大值

变电所名称	THD _U (%)	HRU ₃ (%)	HRU ₅ (%)	HRU ₇ (%)
铜鼓溪	9.6591	1.5465	8.9090	2.9026
绥中北	2.2542	0.4954	2.0356	0.9121



(a)



(b)

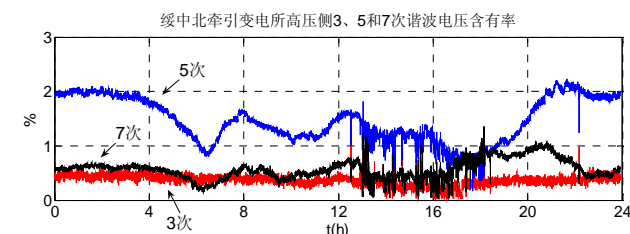


图 1 各个变电所电压总谐波畸变率和各次谐波电压含有率趋势图

(a) 铜鼓溪变电所 (b) 绥中北变电所

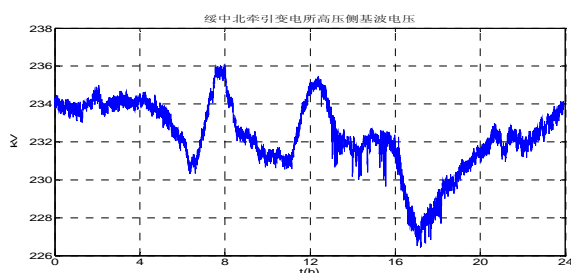


图 2 绥中北牵引变电所高压侧基波电压

由图 1、表 1 中可以看到铜鼓溪牵引变电所电压综合畸变率严重超标，而绥中北牵引变电所也有所超标，各个变电所都是 5 次谐波电压为电网谐波的主要成分，基本上是 5 次谐波电压决定了电压总谐波畸变率 THD_v 的变化趋势及幅值，7 次谐波电压变化趋势与 5 次谐波电压变化趋势一致。两个牵引变电所在电网负荷低谷时段基本上都是在空载运行，铜鼓溪变电所谐波电压远远大于绥中北牵引变电所，电压总谐波畸变率为 9.96%，这与电网的供电能力有关，前面提到铜鼓溪变电所处于云南昭通电网的末端，比起绥中北变电所，其电网的供电能力较弱。谐波源主要是电网中众多的非线性负荷，由多个波动的非线性负荷产生的背景谐波具有一个明显的特征，那就是其幅值随时间作剧烈变化^[1]。波动的谐波源越多，谐波电压幅值分布越杂乱。由图 1 可以看到 5 次谐波电压变化的幅度不是很大，这就说明牵引变电所背景谐波来源主要为大型电力变压器所产生的谐波。文献[2-3]提到西北电研院多次测试表明，西北电网的背景谐波主要来源于变压器群。另外 20 时至 22 时这个时段是居民用电高峰，尤其是电视机、洗衣机等家用电器用电高峰，这些众多家用电器也会产生可观的谐波。

电网在空载或轻载情况下，其末端电压会升高，表 2 统计了各个变电所在电网负荷低谷时段电网电压的情况。

表 2 变电所谷负荷时 A 相基波电压统计情况

变电所名称	铜鼓溪	绥中北(单相)
基波平均值(kV)	70.74	233.99
超出额定电压(%)	11.38	6.36

由表 2 可以看出，电网电压在负荷低谷时段时都有不同程度的升高，其中 110kV 电网铜鼓溪变电所均超出额定电压的 10%，220kV 电网的两个所超过额定电压的 6%，可见负荷低谷时段时电网电压抬升比较大，尤其是在小电网中。而且如果线路中存在未切除的补偿电容，那么会进一步加剧网压的升高。

文献[4]的测试数据显示,在农村电网中在负荷低谷时比负荷高峰时,10kV母线电压的基波电压提高了约5%,但是谐波电压却提高得较多,尤其是5次谐波电压提高了1倍,谐波电压综合畸变率也提高了近1倍,使10 kV母线谐波电压超过了电能质量标准中的谐波限值。并且5次谐波电压为负序电压,负序电压继电器误动,文献[5]提到在夜间22点至凌晨1点左右,变电站66kV母线负序电压滤过器偶尔动作,发出了电网负序电压偏高的信号。

由上面分析可以得知,在电网负荷低谷时段,谐波电压过高的问题不容忽视,这种情况在小电网尤为突出,这时电网中的主要谐波源为变压器,变压器产生的谐波电流影响电网谐波电压大小,现代变压器考虑经济运行,设计在额定电压时的磁密已接近磁化曲线的拐点,电网在这种方式运行下,就要考虑变压器铁芯的非线性特性,此时变压器已经工作在饱和区域,其谐波电流较正常工作时增大许多,同时电网的结构参数也可能对谐波电压起到放大作用。变压器产生的谐波电流的大小与变压器铁芯的饱和程度有关,而电网电压和变压器额定电压下选取的磁密直接影响着变压器工作时铁芯的饱和程度,文献[6]提出电源电压由额定电压提高到1.1倍额定电压时,电网中各次谐波电压都有很大程度的增加,约为在额定电压下的2.5-3倍,当将变压器的膝点由原来的 $\psi_k = 1.20 \text{ p.u.}$ 变到 $\psi_k = 1.30 \text{ p.u.}$ 时,5次谐波电压和7次谐波电压大幅度削弱,7次谐波电压可以忽略,而三次谐波电压没有什么变化,可见这两个因素对电网的谐波电压的影响很大。

2 电网空载末端电压升高

电容效应引起过电压的实质是电容性电流流经电感而引起的电压升高。线路中由于存在着纵向电感,分布电容引起的电流流过这些纵向电感时就产生了电压升高。若线路中无电感则电流不会引起电压升高。此种过电压一般在高压传输线中是非常突出的问题,在一些电网短路容量较小且比较偏远地区问题也比较突出。在由电感电容组成的线路中,当容抗值大于感抗值时,回路中通过的容性电流经过电感时,容抗上的压降被抬高,这种效应称为法拉第电容效应,或者称为电容效应^[7]。

在图3所示无补偿空载电路中,忽略线路电阻,认为线路无损。可得空载时线路中电压 \dot{U}_x 和 \dot{I}_x 的方程为:

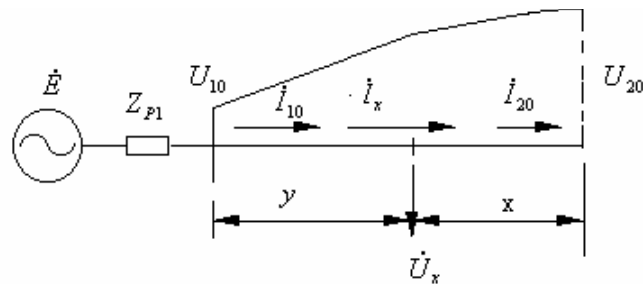


图3 无补偿空载线路

$$\dot{U}_x = \dot{U}_1 \frac{\cosh \beta x}{\cosh \beta l} \quad (1)$$

$$\dot{I}_x = j \dot{U}_1 \frac{\sinh \beta x}{Z_c \cosh \beta l} \quad (2)$$

式中 β 为传播常数; Z_c 为特性阻抗。

上述公式从理论上分析了线路各点的电压电流值与线路首端电压的关系。

另外电源电抗相当于是串联在线路中的电感,故等效为线路的纵向电感增加,会加大电容效应。下面从理论上分析电源电抗对线路电压升高的影响。

仍然以图3为例,图中

$$U_1 = E - I_1 Z_{p1} \quad (3)$$

只考虑电源电抗的影响，认为： $Z_{p1} \approx jX_{p1}$ ，设 $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{X_{p1}}{Z_c}$ ，

则(4-26)，(4-27)成为：

$$U_x = \frac{E \cosh \beta x}{\cosh \beta l - \text{tg} \varphi \sinh \beta l} \quad (4)$$

$$I_x = \frac{jE \sinh \beta x}{Z_c (\cosh \beta l - \text{tg} \varphi \sinh \beta l)} \quad (5)$$

比较式(1)(2)和式(4)，(5)知，分母多了 $-\text{tg} \varphi \sinh \beta l$ ，通常线路条件下 $\text{tg} \varphi \sinh \beta l$ 为正值，换言之，电源电抗加剧了末端电压的升高。

以上情况均忽略了线路的损耗，当考虑损耗时，线路的末端电压升高幅度会有所下降，通常情况下可以忽略线路损耗对末端电压升高的影响。

下面以某线路数据为计算条件，对电压升高做仿真计算，假设为理想电源电压，且线路均匀换位，不同长度线路的末端电压仿真结果如图4所示，图4显示了末端电压随着线路长度增加的变化趋势，末端电压的升高与线路长度不成线性关系，随着线路长度的增加，末端电压急剧上升。

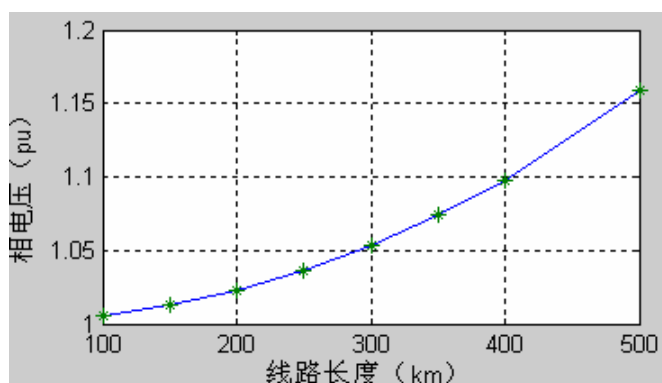


图 4 线路末端电压

上节分析到电源电抗也会加剧末端电压的升高，考虑 110kV 输电线路的实际情况分别选取线路长度 100km 和 150km 不同电源电抗下的仿真，仿真结果如图 5。

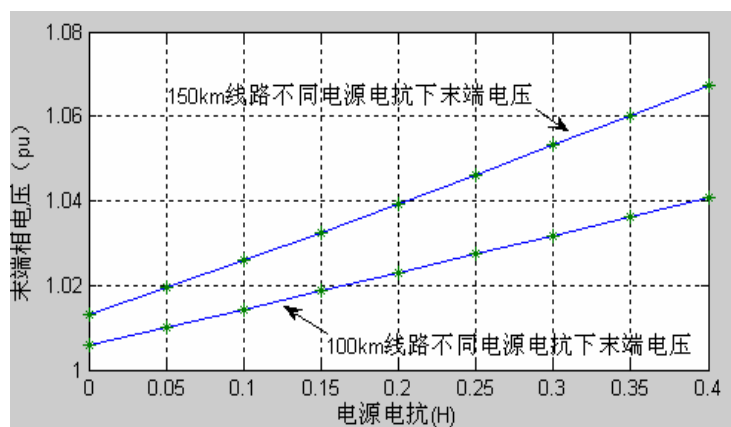


图 5 不同电源电抗下末端电压示意图

随着电源电抗的增加末端电压也随着增加，其对末端电压的升高影响较大这种增加趋势基本是线性的，其斜率与线路长度有关，线路越长，斜率越大，这也就说明了小电网在空载或者轻载时刻电网电压抬升的比较高，而且比供电质量较好的电网抬升的幅度要大。

3 不同状况下变压器空载仿真

3.1 不同等级电压下的变压器空载仿真

在不同等级电压下的变压器空载电流的基波电流和各次谐波电流统计情况如表 3。

表 3 变压器空载电流仿真结果

额定电压倍数		谐波电流次数	基波	3 次	5 次	7 次
1.0	有效值 (A)		1.34	0.04	0.16	0.01
	谐波含量 (%)		100	2.6	11.8	0.86
1.05	有效值 (A)		1.88	0.22	0.34	0.10
	谐波含量 (%)		100	11.4	17.7	5.22
1.1	有效值 (A)		2.73	0.46	0.61	0.21
	谐波含量 (%)		100	17.0	22.4	7.92
1.2	有效值 (A)		6.27	0.03	1.83	0.71
	谐波含量 (%)		100	0.48	29.0	11.0

由表 3 可看出随着电压的升高空载电流急剧增大，除了 3 次谐波电流在 1.2 倍额定电压下减小外，其他各次谐波电流都随着电压的升高而急剧增大，而其中 5 次谐波电流占谐波电流主导地位。

3.2 不同额定磁密下变压器空载仿真

以一单相变压器为例，选取变压器不同膝点电压，膝点就是从饱和状态进入饱和状态的那个点，膝点电压就是膝点处的电压为额定电压的倍数，可见膝点电压越小说明变压器选取的额定磁密越大，变压器铁芯越容易饱和。

在额定电压下各个膝点电压下的变压器各次谐波电流和含有率不是不是很大，差距也不是很大，但当电压升高时，其增大速度不一致。图 6 给出不同膝点电压下的 5 次谐波电流随电压升高变化的示意图，可以看出 5 次谐波电流在膝点电压为 1.2pu 和 1.3pu 情况下基本是线性增加的，而膝点电压为 1.15pu 和 1.1pu 情况下 5 次谐波电流随着电压升高是非线性升高的，特别是工作膝点电压 1.1pu 的情况下，5 次谐波电流随着电压升高而急剧上升，看到在额定电压下各种膝点电压下变压器的励磁电流及其谐波电流相差不是很大，变压器制造厂商考虑经济运行，都把额定磁密选的较大，在正常运行方式下，可以忽略变压器的励磁电流，但当电压升高时，励磁电流和其谐波电流都急剧升高，此时变压器已经成为一种谐波源。

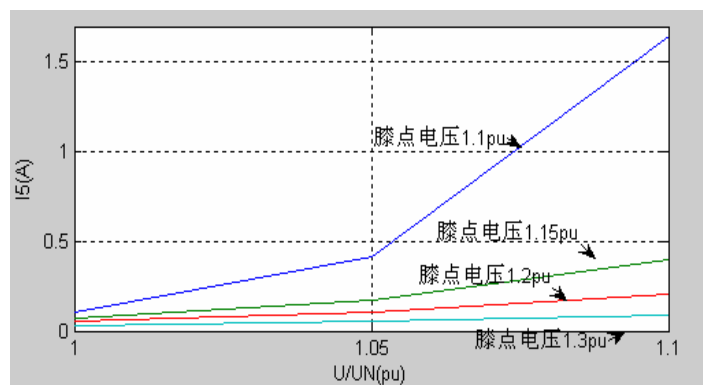


图 6 不同膝点电压下的 5 次谐波电流随电压升高变化示意图

3.3 不同阻抗特性的变压器空载仿真

本节讨论在电网阻抗成感性情况下对变压器空载电流的影响，在前述 Yd11 变压器空载仿真基础上加一电感模拟电网的感性阻抗，仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同感性阻抗变压器空载仿真统计

谐波电流次数		基波 (A)	3 次谐波 (A)	5 次谐波 (A)	7 次谐波 (A)
电压	电感值 (H)				
1.0pu	0	1.34	0.04	0.16	0.01
	0.5	1.32	0.02	0.15	0.01
	1	1.32	0.02	0.14	0.01
1.1pu	0	2.73	0.46	0.61	0.21
	0.5	2.68	0.38	0.56	0.19
	1	2.62	0.29	0.52	0.16
1.2pu	0	6.27	0.03	1.83	0.71
	0.5	6.07	0.06	1.66	0.58
	1	5.95	0.1	1.53	0.47

由表 4 可以看出，当电网的阻抗呈感性的时候，变压器空载电流及各次谐波电流都有减小的趋势，而且随着感性阻抗的增大和变压器饱和程度的增加这种减小趋势愈明显。

图 7 给出了电网在不同容性阻抗值变压器空载电流的情况。



图 7 不同容性阻抗下 A 相 5 次谐波电流

由图 7 可以看出，当电网处于容性阻抗时，使变压器的空载电流和谐波电流发生了复杂的畸变，5 次谐波电流都有放大的现象，在一些特定的容性阻抗时，会使变压器的谐波电流和谐波磁通倾向于互相增强。

4 结论

通过上述实测数据和仿真分析，可得以下结论：

1. 在电网负荷低谷时段，电网谐波电压过高的问题已经不容忽视，这种情况在小电网中更为突出。占主导地位的是 5 次谐波电压，其变化趋势与电网电压的变化趋势一致，这时电网中的主要谐波源为变压器。当变压器运行于一些特殊方式时，就要充分考虑变压器铁芯的非线性特性，对其分析应采用变压器非线性模型；
2. 电网空载末端电压随线路长度的增加而急剧增加，随着电源电抗的增大而线性增大，这就说明在输电

距离比较长，电网短路容量较小的小电网中末端电压升高幅度较大；

3. 影响变压器铁芯饱和程度主要电压大小和变压器选取额定磁密的大小，对于同一台变压器，变压器铁芯的饱和程度随着电压的升高而增加，变压器选取不同额定磁密则影响其增加的程度，选取额定磁密大的变压器将急剧的增大这种增加趋势。
4. 电网的谐波阻抗呈感性时，变压器产生的谐波电流在电网中引起的谐波电压倾向于减小变压器磁通的谐波含量和电流的谐波含量；而当谐波阻抗呈容性时，则变压器的谐波电流和谐波磁通倾向于互相增强。当电网在负荷低谷时段时，会有一些电容器组未切除，使电网的谐波阻抗呈容性，一方面会使电网电压升高，另一方面会引起某次谐波放大现象。

参考文献

- [1] 贺建闽,黄治清,李群湛.电网背景谐波电压测量与研究[J].铁道学报,2005,06:28-33
- [2] 张直平主编.城市电网谐波手册[M].中国电力出版社,2001
- [3] 张直平.电力系统中谐波的某些主要影响[J].电网技术,1989,01:8-14
- [4] 柴宇,房俊龙,高延英.农村电网的谐波分析及治理[J].农机化研究,2006.3:68-70
- [5] 余培岩,马卫平,界金星,张晓宇.变压器 5 次谐波的产生及其对负序电压继电器的影响[J].电力设备,2004,8(5):27-30
- [6] Acha, E.; Arrillaga, J.; Medina, A.; Semlyen, A., "General frame of reference for analysis of harmonic distortion in systems with multiple transformer nonlinearities," *Generation, Transmission and Distribution [see also IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution], IEE Proceedings C*, vol.136, no.5, pp.271-278, Sep 1989
- [7] 施围.电力系统过电压计算[M].西安:西安交通大学出版社.1988

联系方式:

马志远 铁道第三勘察设计院集团有限公司电化电信处

手机: 15822407045 办公室电话: 022-26175694

Email: mazhiyuan@tsdig.com

通信地址: 天津市河北区金沙江路 33 号增 1 号电化电信处 B313 邮编 300251