

电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究

周小涵

(四川电力职业技术学院电气一系, 四川 温江 611130)

摘要:详细地分析了电气化铁路(电铁)产生的谐波在电网中的渗透问题,通过构建公共连接(PCC)的系统和支路的等效谐波模型,提出使用支路系数 k_1 和渗透系数 k_2 来分析电铁谐波在 PCC 的传输特性。分析结果表明并联支路对 PCC 谐波电压具有削弱作用而且随着谐波次数的升高这种削弱将会加强。最后通过 Matlab 对典型系统进行建模,其仿真结果验证了使用这两个系数对电网中谐波渗透进行分析的合理性和准确性。

关键词:谐波;公共连接(PCC)点;支路系数;渗透系数

Abstract: The permeation mechanism of harmonics that generated by electrified railway system (ETS) in power grid is analyzed in detail. The branch parameter k_1 and permeation parameter k_2 are used to describe the effect of ETS on PCC through the harmonic model of PCC. The study of result shows that the parallel circuits will lower the effect of harmonic voltage of PCC and the ability will be enhanced when the harmonic order is higher. Software simulation result of the system is presented that the two parameters can analyze the harmonic penetration accurately.

Key words: harmonics; PCC; branch parameter; permeation parameter

中图分类号: TM734 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0041-03

随着中国电力市场的建立和电能需求的大量增加,电能质量日益显示出其重要性,电力部门对电能质量的关注也日益增强^[1]。另一方面,随着用电设备的更新,用户对供电系统的电能质量提出了更高的要求。自 20 世纪 80 年代初开始,中国电力专家展开大规模的电力谐波研究,相关谐波国家标准 GB/T 14549-93《电能质量公用电网谐波》自 1994 年 3 月起开始实施^[2]。人们对谐波的危害性认识得越来越清楚,目前谐波渗透已经成为世界各国电力部门与用电部门共同关注的一个重要问题。因为它直接决定电力系统中各种有关谐波限制和管理法规的确定,而这些法规又直接影响着用电部门的发展。

电铁在运输能力、运输速度、运输质量、节能降耗等方面显示出很大的优越性,电力牵引已得到广泛的推广和应用,目前国家正在大力发展高速铁路。然而电铁将产生大量的谐波,并通过牵引变电所 PCC 处渗透到公用电网,给电网和其他用户带来了巨大的影响^[3]。传统仪器只能测量用户点的谐波,电铁产生的谐波渗透到用户处的大小目前还没有具体的量化分析,对此做了比较详细的理论分析和仿真。

1 系统结构

电铁是从高压系统直接取电,供电电压等级一般

为 110 kV 或者 220 kV,而民用电力负荷一般通过中间传输系统与高压相连,系统结构如图 1 所示。

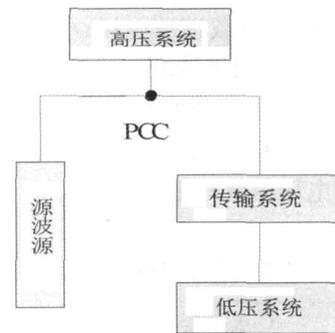


图 1 系统结构框图

一般连接牵引变电所的 PCC 处往往与其他的用电负荷并联。为了清楚地说明问题,这里将介绍不带支路的 PCC 和带有支路的 PCC,进而从中说明电气化铁路产生的谐波在 PCC 处的传输特性。

1.1 不带支路时 PCC 处谐波电压

当牵引变电所 PCC 处没有其他支路时的电压这里称为 PCC 空载谐波电压,其等效电路如图 2 所示。

从等效图中可以看出,空载谐波电压 U_0^h 为

$$U_0^h = I_h^s \times j \cdot X_{oh} \quad (1)$$

式中, U_0^h 为 PCC 空载谐波电压; I_h^s 为注入系统的谐波电流; X_{oh} 为系统等效谐波阻抗; h 为谐波次数。从式 (1) 可见,不带支路时谐波渗透到 PCC 处的

电压与系统的等效谐波阻抗成正比, 即系统的容量越小, 牵引变电所 PCC 处谐波电压越高。

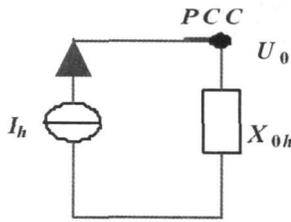


图 2 不带支路时系统等效电路图

1.2 带支路的 PCC 处谐波电压

当牵引变电所 PCC 处带有其他支路时的电压, 文中称为 PCC 有载谐波电压, 其等效电路如图 3 所示。

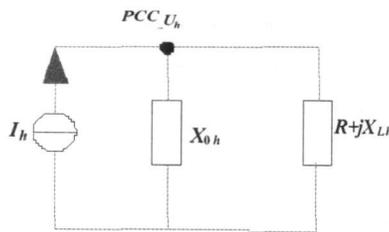


图 3 带支路的系统等效电路图

从等效图中可以看出, 有载谐波电压 U_h^g 为:

$$U_h^g = I_h^g \times j \cdot X = I_h^g \times \frac{X \cdot X_{0h} \times (R + j \cdot X_{Lh})}{R + j \cdot (X_{0h} + X_{Lh})} \quad (2)$$

式中, U_h^g 为 PCC 有载谐波电压; R 为支路等效谐波电阻; X_{Lh} 为支路等效谐波电抗。

为了研究支路对 PCC 处谐波电压的影响, 提出了支路系数这个概念, 其定义为一条支路加入前后 PCC 处谐波电压幅值之比, 即

$$k_l = |U_h^g / U_0^g|$$

从式 (1) 和式 (2) 可以推导出下式:

$$k_l = \frac{\sqrt{R^2 + X_{Lh}^2}}{\sqrt{R^2 + (X_{0h} + X_{Lh})^2}} = \frac{\sqrt{1 + b^2}}{\sqrt{1 + b^2(1 + 1/a)^2}} \quad (3)$$

式中, a 为支路谐波电抗与系统等效谐波阻抗之比, 即 $a = X / X_{0h}$; b 为支路谐波电抗与支路电阻之比, 即 $b = X / R$ 。

当 PCC 带有旁路时, PCC 处的谐波电压有所下降, 即并联支路对 PCC 处的谐波电压有削弱作用, 这种削弱程度可以通过支路系数来衡量, 图 4 为支路系数随 a 、 b 的变化趋势的仿真结果。

从图 4 中可以看出, 支路系数与 a 成正比, 与 b 成反比。也就是说, 系统的容量越大, 支路的等效电阻越大, 支路系数越大, 即对 PCC 点的影响越小。随着谐波次数的升高, 支路系数越小, 对 PCC 处的影响越大。

1.3 渗透系数

当谐波从高压系统向低压系统渗透时, 其等效电路图如图 5 所示。

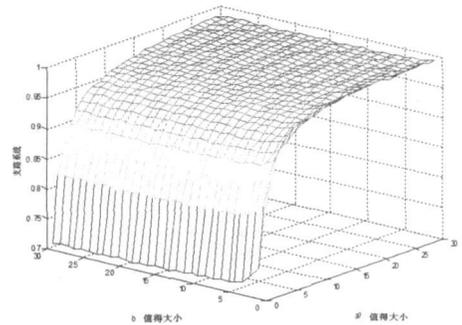


图 4 支路系数 k_l 与 a 、 b 的函数关系图

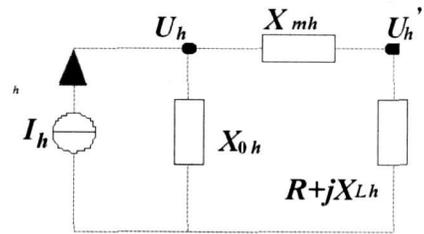


图 5 系统等效电路图

其中, U_h^g 为谐波源注入处的谐波电压, U_h^g 为下一级电压进线处的谐波电压, 为了对谐波在两级电压之间进行渗透的量化, 提出了谐波电压渗透系数 k_e , 从图 5 可以推导出 k_e 的计算表达式

$$k_e = \frac{\sqrt{R_L^2 + X_{Lh}^2}}{\sqrt{R_L + (X_{mh} + X_{Lh})^2}} = \frac{\sqrt{1 + d^2}}{\sqrt{1 + d^2(1 + c)^2}} \quad (4)$$

式中, X_{mh} 为系统中间传输系统的等效谐波电抗; c 为传输系统的等效谐波电抗与负荷等效谐波电抗的比值, 即 $c = X_{mh} / X_{Lh}$; d 为负荷等效谐波电抗与谐波电阻的比值, 即 $d = X_{Lh} / R_L$ 。

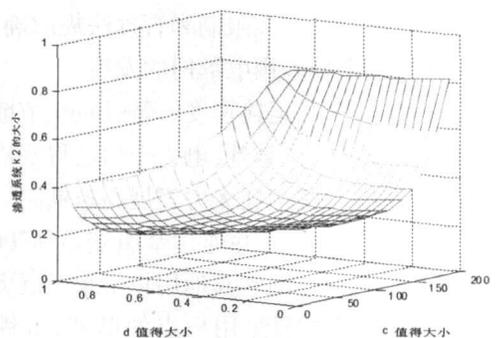


图 6 渗透系数 k_e 与 c 、 d 的函数关系图

从图 6 可以看出, 支路系数与 c 和 d 都成反比。考虑到系统负荷的谐波阻抗是并联等效的, 所以随着谐波次数的增加, c 值逐渐增大, d 值逐渐减小。从另一个角度来说, 负荷的有功功率越大, 无功功率越小,

表 1 算例计算结果

| 谐波次数 | 注入谐波电流 (I_h) | 110 kV 侧 | | | 35 kV 侧 | |
|------|------------------|-------------------------|------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | 不带支路 PCC 谐波电压 (U_0) | 带支路 PCC 谐波电压 (U_h) | 支路系数 (k_1) | 谐波电压 (U'_h) | 渗透系数 (k_2) |
| 3 | 0.023 6 | 0.010 6 | 0.009 0 | 0.847 5 | 0.008 9 | 0.985 5 |
| 5 | 0.021 2 | 0.015 9 | 0.013 4 | 0.844 0 | 0.013 3 | 0.991 2 |
| 7 | 0.011 5 | 0.012 1 | 0.010 2 | 0.842 9 | 0.010 1 | 0.993 7 |
| 9 | 0.005 3 | 0.007 2 | 0.006 0 | 0.842 5 | 0.006 0 | 0.995 1 |
| 11 | 0.003 6 | 0.005 9 | 0.005 0 | 0.842 3 | 0.005 0 | 0.996 0 |
| 13 | 0.002 9 | 0.005 7 | 0.004 8 | 0.842 2 | 0.004 7 | 0.996 6 |
| 15 | 0.002 5 | 0.005 6 | 0.004 7 | 0.842 1 | 0.004 7 | 0.997 0 |
| 17 | 0.002 3 | 0.005 9 | 0.004 9 | 0.842 0 | 0.004 9 | 0.997 4 |
| 19 | 0.002 4 | 0.006 8 | 0.005 8 | 0.842 0 | 0.005 7 | 0.997 7 |

系统的渗透系数越小,对谐波电压传输的阻碍越大。

2 算例分析

文中以一个典型的公用供电网络接线图为例,进行详细的计算分析。电铁接于 110 kV 的高压系统,工业负荷经过一条长为 60 km 的架空线路接于 110 kV 的电压母线上,具体参数如图 7 所示。

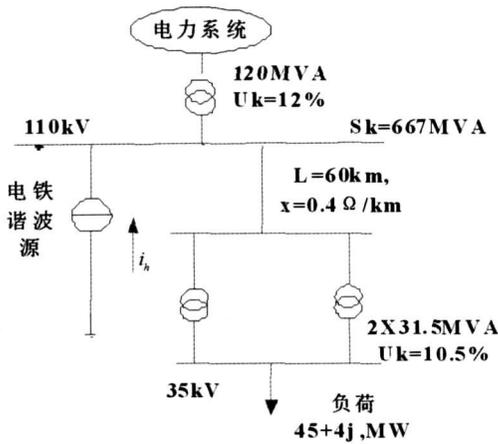


图 7 典型公用供电网络接线图

通过等效计算,可以算出基波下的参数为 $X_{01}=0.15$, $X_{m1}=X_{r1}+X_{l1}=0.167+0.198j=0.365$, $R_{l1}+j \cdot X_{l1}=0.225+2.531j$ 。根据以上公式可以计算出各次谐波下的支路系数和渗透系数,其值如表 1 所示。

从表 1 可以看出,增加一条并联支路对 PCC 处的谐波电压具有削弱作用。这种削弱作用主要由支路系数和渗透系数决定,随着谐波次数的升高,支路系数逐渐减少,渗透系数逐渐增加。当电路带有并联支路后,谐波电压总含有率逐渐衰减:从 2.73 变为 2.30 到 35 kV 侧变为 2.28。

3 结 论

从理论上详细说明了电铁产生的谐波对 PCC 处的谐波影响,并进一步分析了并联支路对 PCC 处谐波电压的削弱作用,这种削弱作用由支路系数和渗透系数综合决定。谐波次数越高,支路系数降低,渗透系数升高,但总体削弱作用还是加强的。并为研究电气化铁路对 PCC 点处的谐波贡献做了铺垫,对国标的修改和制定具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 王思源. 谐波对电能计量的影响 [D]. 山东大学硕士论文, 2006. 4.
- [2] 解绍锋, 李群湛, 赵丽平. 谐波国家标准有关问题的探讨 [J]. 电网技术, 2006, (13): 94-98.
- [3] 解绍锋, 李群湛, 赵丽平. 电气化铁道牵引负载谐波分布特征与概率模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (16): 79-83.
- [4] 张章, 段晓波, 梁志瑞, 等. 电气化铁路供电方案谐波评估方法 [J]. 河北电力技术, 2007, (4): 9-12.
- [5] 赵乾钊, 李群湛. 世界各国电气化铁路谐波限值标准述评 [J]. 电气化铁道, 1999, (4): 5-7.
- [6] 文康珍, 黎文安. 高压电力系统谐波渗透及谐波限制值的确定 [J]. 武汉理工大学学报, 2002, (4): 131-134.
- [7] Pilegni D J, Chandra N H, Emanuel A E. Prediction of Harmonic Voltages in Distribution Systems [J]. IEEE Trans PAS- 100, 1981(3): 1307-1313.

作者简介:

周小涵, 女, 1972. 11, 电气工程师, 主要研究方向为电力系统稳定与电能质量。

(收稿日期: 2009-02-29)