

# 电力系统谐波分析的有效方法

周利东, 滕 欢

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 电力系统谐波分析就是计算系统信号的基波和高次谐波的幅值和相角的过程。频域分析法是谐波分析的一个主要数学方法。论述了谐波分析中的频域分析法, 定义了谐波源及其对电力系统运行的影响。此外, 还讨论了此方法的优缺点, 并对以后的发展方向做出展望。

**关键词:** 谐波分析; 谐波建模; 谐波仿真; 电力系统谐波

**Abstract:** The power system harmonic analysis is the process of calculating the magnitudes and phases of the fundamental and higher order harmonics of system signals. The frequency domain solution method is one of the major mathematical approaches for such analysis. The frequency domain solution method in the harmonic analysis is discussed. The harmonic sources and their effects on power system operation are identified. In addition, the advantages and disadvantages of this method are also discussed, and the direction of future development is prospected.

**Key words:** harmonic analysis; harmonic modeling; harmonic simulation; power system harmonics

**中图分类号:** TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0061-05

## 0 引言

电力系统中的谐波问题由来已久。特别是系统中大容量的电力电子装置的广泛应用, 使得谐波大量增加, 谐波污染越来越严重。而谐波引起电网电压、电流波形畸变, 影响电能质量, 降低电网可靠性, 影响供电企业的经济效益和供用电设备的正常工作甚至损坏设备<sup>[1]</sup>。因此, 对谐波的治理刻不容缓。

电力系统网络中谐波的产生和传播大致如图 1<sup>[2]</sup>所示。

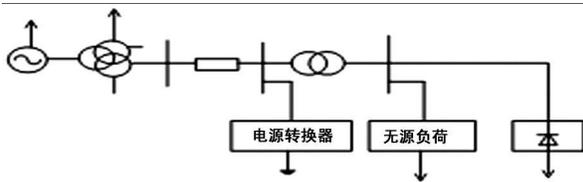


图 1 与谐波有关的电力系统模型

图 2<sup>[2]</sup>对这些相互影响给出了概念上的描述, 其中源代表图 1 的电源转换器, 是作为一个谐波电流源出现的, 产生包含一系列谐波的畸变电流。相反的, 网络作为谐波电压源, 传播由其产生的畸变电压。系统中如果有其他谐波源的话, 则作用于母线。

电力系统谐波分析所关心的就是如何在网络边界上确定谐波的产生和传播。经过这么多年的研究和发展, 已经取得了很大的成果, 文献 [3] 总结出了

有关电力系统谐波建模和仿真的总体概念、理论和成熟的方法。许多谐波测量的标准和准则也已经发布<sup>[4]</sup>。

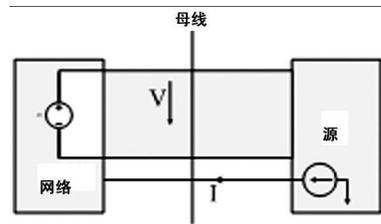


图 2 线性网络和源相互影响

电力系统谐波分析的方法并不是唯一的。根据谐波产生设备的类型、谐波分析的目的和分析演示的期望、对谐波源和网络元件的了解、各种计算资源的不同, 在频域、时域和谐波域已经开发许多方法。限于篇幅, 这里主要讨论频域分析法的建模策略、解决算法以及分析方法, 讨论它们的优点、缺点和实用性, 最后对频域分析法以后的研究进行了展望。

## 1 频域分析法的一般描述

频域分析法是一个计算的过程, 一个网络的总的分析法由一系列在各自频率点上分析方法的综合而来。在分析的过程中, 连续时间域中的系统元件转换到频率域上, 从而得到在频率域中更加简单的元件模

型。由于平衡电力系统中的线性网络对不同谐波  
的响应是相互独立的,因此可以将各次谐波分别进  
行处理,即,对各次谐波分别建立等效电路(在频  
率域中)并求解电流和电压。总的响应可以通过在  
时域中将所有谐波分量相加来得到<sup>[3]</sup>。

仿真的过程中,系统通常分成两部分:①谐波源;  
②线性网络。

根据上面的划分,忽略元件的内部细节,可以将  
大量网络元件简化成 RLC 支路,而且,当存在多个  
谐波源时,可以应用叠加定理。

## 2 频域上的线性网络元件模型

谐波研究的目的在于计算母线谐波电压、支路  
谐波电流、电压和电流总谐波畸变率(THD)以及  
找出谐振条件<sup>[3]</sup>。因此在进行谐波研究时,准确  
模拟系统元件,以保证获得精确、可靠的谐波畸  
变结果是十分重要的。这里所提到的元件模型包  
括发电机、输电线、变压器和无源负载。

下面详细说明这些网络元件的模型。

### 2.1 发电机模型

理想的发电机,其电动势可认为是纯正弦的,不  
含谐波分量。因此在谐波网络中,发电机谐波电  
势为零,其等效电路为由发电机端点经谐波阻抗  
直接与中性点(地)相联。零序电流一般不会进  
入发电机。发电机的谐波阻抗可表示为

$$Z = \begin{cases} Z_0(h) = R_a + jhX_0 & h=3n=3, 6, 9, \dots \\ Z_1(h) = R_a + jhX_d'' & h=3n+1=1, 4, 7, \dots \\ Z_2(h) = R_a + jhX_2 & h=3n-1=2, 5, 8, \dots \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $R_a$  为电枢电阻,单位为  $\Omega$ ;  $X_2$  为负序电  
抗,单位为  $\Omega$ ;  $X_d''$  为次暂态电抗,单位为  $\Omega$ ;  $X_0$   
为零序电抗,单位为  $\Omega$ ;  $h$  为谐波次数。

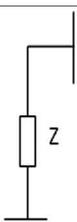


图 3 发电机的谐波等效电路

### 2.2 输电线路模型

在谐波研究中,输电线路的参数计算主要使用  
分布参数,即在集中参数的基础上再考虑长线效  
应而得

到谐波频率下更为准确的输电线路参数。

对于平衡条件下的谐波分析,输电线常用单相  
分布参数模型来表示,如图 4 所示。

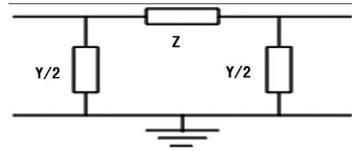


图 4 输电线路的谐波等效模型

分布参数模型包含线路的串联阻抗  $Z$  和线路  
的并联导纳  $Y$ (在低频或者输电线较短时可以只  
考虑串联阻抗,而忽略并联导纳)。如果进一步  
考虑大地回路和集肤效应,那么串联阻抗  $Z$  包  
括两部分——内阻抗和外阻抗<sup>[5]</sup>。内阻抗则主  
要受导体集肤效应的影响,由贝塞尔函数确定。  
外阻抗受大地回路和谐波频率的影响,由卡森  
公式来计算。

建立起这个模型以后,单位长度参数乘以线路  
长度  $x$  得到整段线路的参数。

$$\begin{aligned} Z_{total} &= Z \cdot x \\ Y_{total} &= Y \cdot x \end{aligned} \quad (2)$$

一般的,取线路临界长度  $l_c = 150/h$  (m),其中  
 $h$  表示谐波次数。即当在第  $h$  次谐波环境下,  
如果输电线路的长度  $l < l_c$ ,采用集中参数模  
型;如果  $l \geq l_c$ ,则采用分布参数模型<sup>[1]</sup>。那么  
就应该考虑长线效应。这种情况下,就应该使用  
下面的双曲长线方程<sup>[2]</sup>。

$$\begin{aligned} Z_{total} &= Z_w \sinh \gamma x \\ Y_{total} &= \frac{2}{Z_w} \tanh \frac{\gamma x}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $Z_w$  是波阻抗;  $\gamma$  是传播常数。临界长  
度和谐波频率成反比,因为长波效应和并联导  
纳  $1/2\pi f h C$  有关,  $f$  为基波频率。在平衡条  
件下,完全可以用单相模型代替三相模型,根  
据三相对称的条件得到其他两相的情况。

### 2.3 变压器模型

基波潮流计算尤其是在高压网的计算中,常  
忽略变压器的激磁支路和绕组电阻。变压器参  
数严格说是不对称的。但由于不对称程度不  
大,可近似认为变压器是对称元件。在谐波作  
用下,变压器的等效电感近似认为不变,其谐  
波电抗与谐波次数成正比。而绕组的集肤效  
应和铁心的涡流损耗等在谐波作用下会有所  
增大,一些统计资料表明,变压器谐波等效电  
阻大致与谐波次数的平方根成正比,其阻抗值  
由绕组电阻和漏抗所组成,如图 5 所示。 $h$   
次谐波阻抗为

$$Z_{T_h} = R_{T_h} + jX_{T_h} = \sqrt{h}R_{T_1} + jhX_{T_1} \quad (4)$$

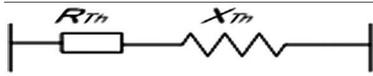


图 5 变压器的谐波等值电路

式中,  $R_{T1}$ 、 $X_{T1}$  分别为变压器的基波电阻和相应序电抗, 其序电抗由该次谐波的序特性决定。

### 2.4 无源负载模型

在谐波分析中, 无源负载通常是指各种家用的和商用的设备, 例如电灯、空调、加热器、冰箱、洗衣机、风扇、泵等等。它们不是被认为是谐波源而是等效成 RLC 电路, 很多设计都采用这些模型。图 6<sup>[1,9]</sup>所示为其中之一。

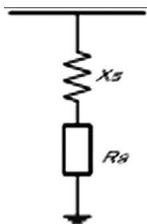


图 6 串联负荷模型

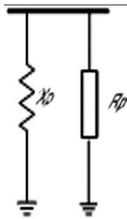


图 7 并联负荷模型

当所有网络元件模型被建立起来以后, 就可以将它们组合在一起构成表示电力传输系统的完整电路。

## 3 频域分析方法

对于线性网络, 尽管从需要的数据、关注的结果、问题的提法和实现的算法方面有不同的地方, 但都可以用这 3 种方法来分析: 频率扫描法、电流注入法和谐波潮流法。

### 3.1 频率扫描法

频率扫描也称阻抗扫描, 得到的是待研究母线的驱动点阻抗模值与谐波次数或频率之间关系的一张图, 从中可以检测到系统的谐振点<sup>[3]</sup>。阻抗值的突然降低意味着串联谐振, 较小的激励电压就能产生很大的电流。而阻抗值的突然上升标志着并联谐振, 较小的激励电流就能产生较大的电压<sup>[6]</sup>。频率扫描法就是用于监测这些可能发生的危险谐振情况。而母线谐波电压可由  $V=ZI$  求得, 线路谐波电流可由  $I=YV$  求得。为此, 首先必须通过包含所有网络元件的

联合模型结合下面的矩阵形式来建立网络导纳矩阵。

$$I_{n \times 1} = Y_{n \times 1} V_{n \times 1} \quad (5)$$

$n$  表示系统的节点数。

$I_{n \times 1} = [I_1, \dots, I_i, \dots, I_n]^T$  是  $I_i$  注入  $i$  节点的谐波电流注入矢量。

$V_{n \times 1} = [V_1, \dots, V_i, \dots, V_n]^T$  是谐波电压矢量,  $V_i$  表示节点上  $i$  的谐波电压畸变水平。

$$Y_{n \times n} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1j} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{ij} & \dots & Y_{in} \\ Y_{j1} & \dots & Y_{ji} & \dots & Y_{jj} & \dots & Y_{jn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nj} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (6) 是网络导纳矩阵,  $Y_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  之间的互导纳, 由网络元件计算得出。

应当指出, 在非平衡状态下, 式 (5) 需要以多相形式建立, 使矢量和矩阵是原来的三倍。在独立谐波源情况下, 求解式 (5) 会得出  $n$  个节点的谐波电压分布。在节点  $i$  处电压值  $V_i$  相当于此谐波频率下的节点驱动点阻抗。

但是, 频率扫描法不能考虑谐波源产生的谐波和系统的相互影响, 在处理谐振点附近的电力系统时容易得出错误的结果。

### 3.2 电流注入法

在实践中, 谐波源在单一频率时不产生谐波电流, 但是不同的谐波频率下会产生一系列谐波电流, 当它们注入系统时, 通过系统阻抗的电流导致各个节点的电压畸变。为了确定所关心的那些节点的电压畸变, 通常采用电流注入法 (CM), 也叫电流穿入法。此方法中, 谐波源被设计成理想电流源, 注入各个节点各次谐波电流的幅值和辐角与基波电流的幅值和辐角分别成线性关系。

将某个谐波频率下的  $I_{n \times 1}$  带入式 (5) 中, 可以计算出此谐波下的各个节点的电压畸变  $V_{n \times 1}$ 。对其他频率的谐波重复进行此计算。不过对计算的谐波次数存在一个上限, 一个原因是谐波次数增加时谐波级数会减少, 而且高次谐波可以忽略; 另一个原因是感性传输系统的导纳会随着频率增加而成比例增加。因此高次谐波电流不需要进行深入研究。

在每个节点, 可以得到谐波电压的频谱, 其他指标例如 THD (总的谐波畸变) 也可以确定。在上面的方法中, 没有用到谐波电流相位的信息。如果只考虑

一个谐波源,这都没有关系。但是当有多个谐波源时,谐波电流可以考虑相位信息也可以不考虑。由它们引起的电压失真可以考虑进来也可以忽略。所以,有多个谐波源时,包括相角信息是必要的,用来表示谐波电流和电压向量的。如果电流频谱来自现场数据,那么必须保持测量的同步以保证准确的相角信息。电流注入法对作为谐波电流源产生的谐波电流进行了适当简化,因此该方法易于掌握且实际计算效率较高,适用于大型电力系统分析,同时也能应用于对三相不对称系统的谐波分析。实验表明,电流注入法只在电源电压畸变小于 10% 有效<sup>[7]</sup>,而且在电力系统中常常会发现两种谐波源。

类型 1: 电子开关设备, 谐波电流产生对电源电压不太敏感。

类型 2: 非线性设备, 母线电压的畸变水平对其影响相当大。

电流注入法特别适合于工作在理想状态下属于类型 1 的设备。在这种情况下, 由这些设备产生的谐波电流可以由频谱很好地近似。例如, 作用在理想的正弦交流电压和直流电流的一个 12 脉冲 AC-DC 转换器仅产生  $12h \pm 1$  次谐波,  $h=1, 2, 3, \dots$ 。但是, 如果谐波源是类型 2 则电流注入法对取决于电压失真的电流频谱是错误的。另一个叫做谐波潮流 (HPF) 的方法可以弥补电流注入法的一些不足。

### 3.3 谐波潮流法

含有谐波源的情况下, 系统的潮流由基波潮流和谐波潮流两部分组成, 谐波潮流归根结底是由基波潮流在非线性的元件中转换产生, 且只占系统潮流的一小部分。谐波潮流计算是进行谐波分析的重要手段, 目前计算谐波潮流的算法主要有: 线性法<sup>[8]</sup>, 它忽略基波潮流与谐波潮流的相互影响, 分别计算基波潮流与谐波潮流; 非线性法<sup>[9, 10]</sup>, 它考虑基波潮流与谐波潮流的相互影响, 通过两者的联立迭代求解。

线性法假定谐波源的电流大小和相位仅与基波电压有关, 而与谐波电压无关, 并在不考虑谐波潮流的情况下先算出基波潮流, 然后根据基波电压算出谐波源电流, 最后分别求解各次谐波网络方程  $\dot{I} = Y^k \dot{V}^k$ , 就可算出谐波潮流和各监测量的各项谐波指标。线性法计算速度快, 收敛性能好, 程序设计简单, 所以其成为当前使用最为普遍的一种算法。但实际上谐波源的电流总是受相应的谐波电压影响的, 由于此法忽略了基波潮流和谐波潮流的相互影响, 所以计

算精度较差。

非线性法考虑了各次谐波电压对谐波源电流的影响, 将谐波源的各次谐波表达成相应的谐波电压的函数, 并计及基波潮流与谐波潮流的相互影响, 通过两者的联立迭代求解, 直至满足迭代收敛精度, 即得谐波潮流解。非线性法先采用 PQ 分解法以节点基波功率平衡为收敛准则进行一次基波潮流迭代, 然后联立迭代谐波源电流方程  $I_k = f_k(U_{s1}, U_{s2}, \dots)$  和节点电压方程  $I_k = Y_n U_n$  进行谐波潮流求解。从能量平衡的观点来看, 谐波源向系统提供的谐波功率来自其从系统中吸取的基波功率, 即

$$P_{s1} = P_{d1} + \sum P_{si} \quad (7)$$

其中,  $P_{s1}$ ——吸取的基波功率;

$P_{d1}$ ——转化成其他形式的能量;

$P_{si}$ ——转化为  $i$  次谐波功率。

所以谐波潮流的平衡将影响到基波功率的平衡, 当谐波潮流改变时, 基波潮流要重新进行迭代, 这样逐次迭代, 谐波潮流趋于收敛, 谐波源节点基波功率也趋于收敛, 总迭代过程的结束取决于基波潮流的最后收敛。

非线性法由于考虑了基波潮流与谐波潮流的相互影响, 比线性法计算精度要高, 但由于基波潮流与谐波潮流联立迭代, 非线性法方程维数多, 计算量大, 占用内存多, 计算速度和收敛速度要慢; 基波与谐波数值上相差较大, 迭代过程中, 基波电压的变化可能引起谐波电流的变化较大, 不利于潮流的平稳收敛, 甚至可能出现不收敛的情况; 谐波电压初值选择不当, 导致收敛困难。

## 4 总 结

频域分析法是电力系统谐波分析中一个很好的工具。在频域分析法中, 所研究的网络是线性的和时间不变的, 由于其本身的性质, 频域分析法要求对一个网络的详细信息进行计算, 对一个频率段上的每一个频率这些信息都需要清楚地计算出来。而且, 所要获得的信息是高度精密的。频域分析法更加适合于研究频率依赖、系统等价和频率响应的现象。但是它们不用来解决与谐波产生过程中随时间变化的因素有关的问题或者不同频率电力电子转换器的相互影响。

在电力系统分析中, 由于电力传输系统频率依赖

性性质和本身良好的线性关系,使得在频域范围内的线性方程可以恰当地表示电力网络。但是谐波源的 V-I 关系更加复杂,通常是非线性和时变的。为了找出合适的谐波源表示法已经做了许多努力,这也促使谐波分析不同方法的发展。目前的研究都在一个确定的框架内进行,考虑谐波产生源随机的特征仍然有许多领域去探索。需要确定与源谐波电流和电压有关的概率密度函数,需要从统计学的角度考虑网络怎么变化。随着增加的电源转换器的投运,电力网络变得更大、更复杂而且不断地变化,这些题目都会引起许多研究者的兴趣,需要做更进一步的研究。

### 参考文献

[1] 张一中,宁元中,宋永华. 电力谐波 [M]. 成都:成都科技大学出版社, 1992.

[2] Wang Yifei S Chen S S Choi An Overview of Various Approaches to Power System Harmonic Analysis [J]. The 8th International Power Engineering Conference (IPEC 2007) 3-6 Dec 2007; 338 - 343.

[3] George J W akileh 著,徐政译. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

[4] GB 14549-93 电能质量 公用电网谐波 [S].

[5] Zheng Xu Hongtao Liu The Harmonic Model and Its Algorithm for Coupled Multiphase Transmission Line [J]. Harmonics and Quality of Power 2000. Proceedings Ninth International Conference on Volume 3. Page (s): 938 - 941.

[6] Grady WM, et al(1993). Power Factor Correction and Power System Harmonics Short Course New Mexico State University.

[7] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part I: Concepts Models and Simulation Techniques [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 11, 1996.

[8] 陈宝林. 最优化理论及算法 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.

[9] A. T. Sario M. S. Calovic M. B. Djukanovic. Fuzzy Optimization of Capacitors in Distribution Systems [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(5): 415-422.

[10] K. H. Abdul-Rahman S. M. Shahidepour A Fuzzy-based Optimal Reactive Power Control [J]. IEEE Transaction on Power Systems 1993, 8(2): 662-670.

(收稿日期: 2009-12-10)

(上接第 21 页)

由于电源的电势与断开相恢复电压之间的电压差对合闸成功与否有重要影响,为了提高重合的成功率,重合闸装置可以实时测量断开相电压,以确定最佳的合闸时机,如何解决好合闸时机是下一步研究的重点。

### 参考文献

[1] 刘浩芳,王增平,徐岩,等. 带并联电抗器的超特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据 [J]. 电网技术, 2006, 30(18): 29-34.

[2] 商立群,白维祖,程刚,等. 带并联电抗器的线路单相自适应重合闸故障判别原理 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 81-84.

[3] 李斌,李永丽,贺永李,等. 750 kV 输电线路保护与单相重合闸动作的研究 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 73-76.

[4] 索南加乐,孙丹丹,付伟,等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75-81.

[5] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法 [J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-31.

[6] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1996.

[7] 林湘宁,刘沛,程时杰. 超高压输电线路故障性质的复值小波识别 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 33-38.

[8] 李斌,李永丽,曾治安,等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸 [J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-57.

[9] 范越,施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.

(收稿日期: 2009-9-23)