DOI: 10.7641/CTA.2017.60027

城市电网谐波电流耦合机理分析与研究

江友华,钱 彦[†],曹以龙

(上海电力学院电子与信息工程学院,上海 200090)

摘要:本文针对多谐波源构成的多目标、非线性强耦合系统,从宏观层面上研究谐波源传导、输电线路传递、多 谐波源叠加等耦合机理.为此,本文首先建立了多谐波源耦合模型;其次深入分析城市电网谐波耦合机理,多层次 剖析谐波传导、谐波放大、谐波叠加等耦合因子及其特性.在此基础上,采用导纳矩阵对角化思路研究了多谐波源 的解耦方式和解耦目标,为多谐波源的责任区分、谐波源治理提供清晰的思路.最后,通过应用案例及仿真验证了 理论及算法的可行性.

关键词:多谐波源;耦合机理;谐波传导;解耦

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Coupling mechanism analysis and study on harmonic current of multi-harmonic sources

JIANG You-hua, QIAN Yan[†], CAO Yi-long

(School of Electrical and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at multi-objective, nonlinear and strong coupling system which is composed of the multi harmonic sources, the harmonic transmission and multi harmonic superposition coupling mechanism is studied in this paper form the macro level. Therefore, first of all, the city grid coupled harmonic source model is established through the language of Mathematics; Secondly, the coupling factors such as harmonic wave, harmonic amplification, harmonic superposition and their characteristics are analyzed in many levels. On this basis, the decoupling method and decoupling target of multi harmonic sources is also analyzed by the idea of using admittance matrix. Finally, the feasibility of the theory and algorithm is verified by simulation and experiment.

Key words: multi-harmonic sources; coupling mechanism; harmonic transmission; decoupling

1 引言(Introduction)

随着城市人口的快速增长及工业的发展,电网中的非线性元件分布也由传统电网的低电压向高电压转移,高压电网中的电气污染向其他各电压等级电网的传递,将成为其他电压等级电网的重要背景污染量^[1],同时城市电网与负荷构成出现了新的变化趋势,形成电流型谐波源和电压型谐波源并存的格局,它们分布在整个线路上,其类型及接入点各不相同,其产生的幅值大小、相位和频率也不一样,当它们作用在电网的馈线或者母线公共接点处时,会出现相互叠加或者抵消的现象^[2-4],伴随着节点数目的增加,谐波源之间的关系可能变得更加的复杂,且这种耦合关系不仅影响谐波责任区分、谐波源定位及谐波治理,也给电网带来潜在危机.为此,深入分析与研究城市电网

本文责任编委: 梅生伟.

Supported by Construction of Local Capacity in Shanghai City (14110500900).

的谐波耦合机理,理清相互之间的构成及关系很有必要.

可喜的是,自从"奖惩性方案"提出以后,国内外 学者在谐波传导与耦合、谐波源辨识与责任区分等领 域做了许多可贵的探讨.如有学者利用谐波潮流手段 来分析电网谐波传导特性,耦合机理及功率流向^[5-8]; 在谐波源定位的研究主要有基于功率潮流的定位方 法和基于谐波阻抗的定位方法^[9-12];文献[13-15]采 用概率和数理统计的方法研究了多个谐波源谐波电 流叠加,建立了非线性负荷所产生的谐波电流的统计 特性和模型.文献[15-16]则对谐波源责任区分提出 了相应的方法及策略.

然而这些工作大多局限于谐波传导、责任区分或 谐波源定位的单点研究,相互之间的关联性没有考虑,

收稿日期: 2016-01-14; 录用日期: 2016-11-08.

[†]通信作者. E-mail: 462856618@qq.com.

上海市地方能力建设项目(14110500900)资助.

采用了太多的假设及静态思维,而忽略了城市电网的 谐波源呈现多目标、非线性强耦合的动态特征.这是 因为城市电网的谐波电流不仅同本级电网谐波源有 关,也同输电线路的谐波传导、受电端的参数有关,这 样在进行城市电网谐波耦合特性研究时,需要从宏观 层面上,多个层次进行城市电网谐波特性的整体研究. 为此,本课题结合城市电网特征,综合分析谐波耦合 机理及耦合因子,并提出解耦方法,为多谐波源的责 任区分、谐波源定位及治理提供理论基础.主要研究 如下:1)建立数学语言能够描述的城市电网多谐波源 耦合模型;2)从供电端的谐波传导、输电线路的谐波 传递、受电端的谐波放大及多谐波源的叠加等多层次 分析城市电网谐波耦合机理;3)根据城市电网谐波耦 合机理,提出多谐波源解耦目标,为多谐波源的责任 区分、谐波源治理提供清晰的思路.

2 城市电网谐波耦合模型(Harmonic coupling model of urban power network)

图1为城市电网示意图,基于大系统分解协调原 理,可将其分解成4个层面,分别是供电层、输电层、 多谐波层及受电层.其中:第1层为供电层,表示上级 电网向下级电网供电;第2层为输电层,承载输电任务, 具有谐波传导功能;第3层表明多谐波层各谐波源耦 合性强,图1中右下侧用两组符号表示多谐波源之间 的耦合关系;第4层为受电端,为用户或谐波治理装置 等,易同谐波源及电网参数发生震荡.



图 1 城市电网多谐波源分布与耦合结构

Fig. 1 Distribution and coupling structure of multiple harmonic sources in urban grid

目前很多文献对谐波源模型都有研究,其中获 得广泛认同的是谐波耦合导纳矩阵模型^[17-18].为 此,本文也采用谐波耦合导纳矩阵,并结合城市电 网多谐波源的实际,考虑谐波源基波与高次谐波的 影响,以及不同谐波源不同频率谐波电流的影响, 对应的谐波网络节点方程如下:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^{h} & Y_{12}^{h} \cdots & Y_{1n}^{h} \\ Y_{21}^{h} & Y_{22}^{h} \cdots & Y_{2n}^{h} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1}^{h} & Y_{m2}^{h} \cdots & Y_{mn}^{h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $I_k = [I_{k,1} \ I_{k,3} \ I_{k,5} \ \cdots]^{\mathrm{T}}$,表示第k个谐波源 的基波电流与奇次谐波电流,是个列向量; $Y_{ij}^{\mathrm{h}} = [Y_{ij}^{\mathrm{h},1} \ Y_{ij}^{\mathrm{h},3} \ Y_{ij}^{\mathrm{h},5} \ \cdots](i=1,2,\cdots,m,j=1,2,\cdots,n)$,即第i个谐波源的h次谐波电流与第j个谐波源 的各次谐波节点电压的导纳向量,是个常量; $U_k = [U_{k,1} \ U_{k,3} \ U_{k,5} \ \cdots]^{\mathrm{T}}(k=1,2,\cdots,n)$,即第k个谐 波源的基波电压与奇次谐波电压.

以上公式可简写为

$$I_{\rm h} = Y_{\rm h} U_{\rm h}.$$
 (2)

式(2)就是本文提出的谐波耦合矩阵模型, *I*_h为 谐波电流注入向量, *U*_h为谐波节点电压向量, *Y*_h为 谐波耦合导纳矩阵, 其具有如下特点:

1) 公式中, 谐波电流的求解不仅与该节点处各 次谐波节点电压有关, 还与其他节点的各次谐波节 点电压有关;

2) 矩阵Y_h具有各次谐波耦合特性,随着矩阵维 数增加,矩阵元素大小递减,表明高次谐波电压对 电流的影响减小;

3) 矩阵Y_h中, 第1行元素数值相对较大, 说明基 波电流受各次谐波电压的影响较大;

4) 矩阵Y_h中, 第1列元素数值相对较小, 说明各 次谐波电流受基波电压的影响较小, 但是通常基波 电压值会比较大, 因此其影响效果不容忽视;

5) 矩阵Y_h对角线附近的数值相对较大,其他矩阵元素依然不为0,说明各次谐波电压、电流依然有耦合关系.

实际中,某些节点离谐波源可能比较远,受谐波 电流的影响会比较小,即耦合关系比较薄弱,导致 Yh矩阵元素部分为零.只考虑同频率谐波时,Yh矩 阵即成为稀疏矩阵.假如略去Yh矩阵中耦合元素, 只保留Yh矩阵中首行首列和对角线元素,用式(2)近 似计算公式,就是常见的节点导纳矩阵.

用D代表简化和精确模型的精度,公式如下:

$$D = \frac{\sum_{k=1}^{n} (I_{\rm h} - I'_{\rm h})^2}{\sum_{k=1}^{n} I_{\rm h}^2} \times 100\%.$$
 (3)

在h次谐波下,式中I_h表示精确模型中电流计算 幅值,I_h表示简化模型中谐波电流计算幅值.

3 谐波耦合机理及耦合因子分析(Harmonic coupling mechanism and coupling factor analysis)

由图1可知,多谐波源的谐波导纳矩阵系数不仅 同本级电网谐波源的阻抗有关,还同上级电网的变 压器、输电线路谐波传导系数、受电端谐波衰减或 放大系数有关.为此,下面将分别进行谐波耦合因 子分析.

3.1 不同电压等级谐波传导的耦合因子分析(Coupling factor analysis of harmonic conduction in different voltage levels)

电网中变压器普遍存在,当谐波在电网不同电 压等级传播时,谐波电流分配与公共连接点处有所 不同.按照图1所示结构,不同等级电网谐波传导模 型如图2所示.

图 2 不同等级电网谐波传导模型

Fig. 2 Harmonic conduction model of different levels of power grid

在图2中,只考虑母线*i*的上级谐波源与母线*j*的 非线性负荷谐波源在这两个节点的作用,可用谐波 导纳方程表示^[15]:

$$\begin{bmatrix} I_i^{\rm h} \\ I_j^{\rm h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ii}^{\rm h} & Y_{ij}^{\rm h} \\ Y_{ji}^{\rm h} & Y_{jj}^{\rm h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i^{\rm h} \\ U_j^{\rm h} \end{bmatrix},$$
(4)

则上级谐波源单独作用在节点j的谐波电压 U_{ji}^{h} 由 I_{i}^{h} = $Y_{ji}^{h} \cdot U_{ji}^{h}$ 求出,其等效于用户侧注入电流 I_{ji}^{h} 的作 用:

$$I_{ji}^{h} = \|\frac{Y_{jj}^{h}}{Y_{ji}^{h}}\| \cdot I_{i}^{h}.$$
 (5)

传入节点j的一般线性负荷的实际电流为

$$I_{\rm L}^{\rm h} = \|\frac{Y_{\rm L}^{\rm h}}{Y_{ji}^{\rm h}}\| \cdot I_i^{\rm h},\tag{6}$$

式中IL为线性负荷在节点j的等效谐波导纳值.

通常由于 $||Y_{jj}^{h}|| \gg ||Y_{L}^{h}||, 因此 ||I_{ji}^{h}|| \gg ||I_{L}^{h}||, I_{L}^{h}$ 能在现场测量到.

通常高电压级负荷扰动源谐波电流向低电压级 传导时,由于谐波电压传输系数近似为1,谐波电流 很小,其作用可以忽略.

3.2 输电线路的谐波传导及耦合因子分析(Harmonic transmission and coupling factor analysis of transmission line)

为了方便分析, 输电线路的等值电路用集总参数表示, 如图3所示, 其中输电线路采用T型等值电路. 左侧表示高电压等级, Z1为系统阻抗, I1为谐波源流向高压等级母线的电流, 右侧表示低电压等级I2为谐波源流向低压等级母线的电流.

Fig. 3 Simplified distribution parameter

$$I_{\rm s} = I_1 + I_2, \tag{7}$$

$$\begin{cases} I_1 = I_s \frac{L_2}{L_1 + L_2}, \\ I_s = I_s \frac{L_1}{L_1} \end{cases}$$
(8)

$$\begin{cases} Z_{\rm T1} = \frac{X_{\rm C}(ch\gamma L_1 - 1)}{sh\gamma L_1}, \\ Z_{\rm C1} = \frac{Z_{\rm C}(ch\gamma L_1 - 1)}{sh\gamma L_1}, \\ Z_{\rm C1}(ch\gamma L_2 - 1) \end{cases}$$
(9)

$$\left\{ Z_{\text{T2}} = \frac{Z_{\text{C}}(ch\gamma L_2 - 1)}{sh\gamma L_2}, \right.$$

$$\left\{ Y_{\text{T2}} = \frac{sh\gamma L_1}{sh\gamma L_2}, \right.$$

$$\begin{cases} Y_{\rm T1} = \frac{1}{Z_{\rm C}}, \\ Y_{\rm T2} = \frac{sh\gamma L_2}{Z_{\rm C}}, \end{cases}$$
(10)

$$I_1 = I_s \frac{(Z_1 sh\gamma L_1 + Z_{\rm C} ch\gamma L_1)ch\gamma L_2}{Z_1 sh\gamma L + Z_{\rm C} ch\gamma L}, \quad (11)$$

其中 $L = L_1 + L_2$. 假设 I_m 为距离上级变电所m处的谐波电流,则

$$I_{\rm m} = I_1 \frac{ch\gamma L_2(Z_1 sh\gamma m + Z_{\rm C} ch\gamma m)}{Z_1 sh\gamma L + Z_{\rm C} ch\gamma L}.$$
 (12)

定义谐波电流传递系数或放大倍数为

$$T_{\rm h} = \frac{I_{\rm m}}{I_1} = \frac{ch\gamma L_2(Z_1 sh\gamma m + Z_{\rm C} ch\gamma m)}{Z_1 sh\gamma L + Z_{\rm C} ch\gamma L}.$$
 (13)

由式(13)可知, 当分母为0或者接近于0时, A变成最大, 即线路发生谐振. 谐振条件为 $Z_1 sh\gamma L + Z_C$ $ch\gamma L = 0$, 因为 $\gamma L \ll 1$, 所以 $sh\gamma L \approx \gamma L$, $ch\gamma L \approx 1$, 那么 $Z_1 = -Z_C / \gamma L$.

又由式(13)可知,谐波源注入谐波电流的传输特 性和谐振频率主要受线路长度、系统阻抗、网络分 布参数等影响,且谐波放大倍数与距离、谐波次数 等有关系.随着谐波次数和线路距离的增大,城市 高压电网谐波传递系数的阻抗和导纳与输电线路传 递系数将发生变化,使得输电线路的谐波传导与耦 合效应已不能被忽略.

3.3 受电端等值电路及谐波传递系数(Equivalent circuit and harmonic transfer coefficient)

由于受电端通常为用户或谐波治理装置、无功补偿装置,在参数发生变化时,容易同电网参数发 生变化,引发线路谐波电流的衰减或放大,其等值 电路如图1受电端所示.图1中:C等效为输电线路 及用户安装的无功补偿装置电容总和,*I*_x为负荷谐 波电流,*I*_{sx}为注入系统谐波电流,*I*_{cx}为注入电容电 流.则根据图1所示,注入系统谐波电流*I*_{sx}与谐波源 电流*I*_x的关系可表示为

$$k_{\rm Lh} = \frac{I_{\rm sx}}{I_{\rm x}} = \frac{U_{\rm x}/Z_{\rm Tx}}{U_{\rm x}/Z_{\rm Tx} + U_{\rm x}/X_{\rm cx}} = \frac{X_{\rm cn}}{X_{\rm cn} + Z_{\rm Tx}},$$
 (14)

式中 $Z_{\mathrm{Tx}} = R_{\mathrm{sx}} + X_{\mathrm{sx}}.$

由式(14)可知,当受电端的感抗同电网系统感抗 发生共振时,将对谐波源的谐波电流起放大作用, 此时受电端对谐波源的谐波电流影响将不能被忽 略.

3.4 多谐波源耦合叠加分析(Analysis of multi-harmonic superposition coupling)

按照图1所示拓扑,假设分布式电网有n个谐波 源支路,母线公共节点PCC是受这n个谐波源支路 影响的关注母线.其中I_{xi}(下标表示谐波源i对关注 母线X的作用)为谐波源的h 次谐波电流,其等效电 路采用谐波源的戴维南等效电路如图4所示.

为了推导方便,以下公式推导均省略上标h,表示在h次谐波下进行.假设在母线X处,其h次谐波 电压可表示为

$$U_{\rm X} = Z_{\rm Xi} I_{\rm Xi} + U_{n-1}^{i}, \tag{15}$$

其中: Z_{Xi} 为谐波源i与母线X之间的互阻抗, U_{n-1}^i 为除谐波源i的其余(n-1)个谐波源负荷在母线X

当系统侧谐波源单独作用时,在PCC处产生的 谐波电压为

$$U_{\rm pcc-s} = \frac{U_{\rm s} \cdot Z_{\rm eq}}{Z_{\rm s} + Z_{\rm eq}} \tag{16}$$

称为背景谐波电压, $Z_{eq} = 1/\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{Z_{ci}}$ 为全部支路阻抗的并联之和. 某一支路 $k(k = 1, 2, \dots, n)$ 谐波源单独存在时, 引起的谐波电压(PCC处)为

$$U_{\rm pcc-ck} = I_{\rm ck} \cdot Z'_{\rm eq} = \frac{U_{\rm ck} \cdot Z'_{\rm eq}}{Z_{\rm ck} + Z'_{\rm eq}}, \qquad (17)$$

其中 $Z'_{eq} = 1/(\frac{1}{Z_s} + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{1}{Z_{ci}})$ 为除 Z_{ck} 外,其他阻

抗的并联阻抗之和,则谐波源Uck单独作用下支路的电流为

$$I_{\rm ck} = \frac{U_{\rm ck}}{Z_{\rm ck} + Z'_{\rm eq}},\tag{18}$$

此电流称为"理论电流".得出系统侧谐波源和用户侧谐波源分别单独作用下的谐波电压后,由叠加定理可得到PCC处的谐波电压,即

$$U_{\rm pcc} = U_{\rm pcc-s} + \sum_{k=1}^{n} U_{\rm pcc-ck}.$$
 (19)

由此,得出支路中的某一谐波对PCC处谐波贡 献量的指标因子为

$$\lambda_k = \frac{U_{\text{pcc}-ck}}{U_{\text{pcc}}} = \frac{I_{ck} \cdot Z'_{eq}}{U_{\text{pcc}}}.$$
 (20)

同样方法,可计算出谐波源 U_{cj} 单独作用下的相 关参数: $Z''_{eq} = 1/(\frac{1}{Z_s} + \sum_{i=1,i\neq j}^{n} \frac{1}{Z_{ci}})$ 为除 Z_{ci} 外,其 他阻抗的并联阻抗之和.

$$I_{\rm cj} = \frac{U_{\rm cj}}{Z_{\rm cj} + Z_{\rm eq}^{\prime\prime}} \tag{21}$$

为*U*_{cj}单独存在下支路的电流.可推断出谐波源*U*_{ck} 及*U*_{cj}同时存在下支路*k*的"实际电流":

$$I_{ck-ac} = I_{ck} - I_{cj} \cdot \frac{Z_{eq}^{\prime\prime}}{Z_{ck}},$$
(22)

从而更改 λ_k 为 λ_{kj} :

$$\lambda_{kj} = \frac{I_{ck-ac} \cdot Z'_{eq}}{U_{pcc}} =$$

$$\frac{I_{ck} \cdot Z'_{eq}}{U_{pcc}} - \frac{I_{cj} \cdot Z'_{eq} \cdot Z''_{eq}}{U_{pcc} \cdot Z_{ck}} =$$

$$\lambda_k - \frac{I_{cj} \cdot Z'_{eq} \cdot Z''_{eq}}{U_{pcc} \cdot Z_{ck}}.$$
(23)

由式(23)可看出指标因子在其他谐波源的作用

下确实发生了变化,当系统中存在多个谐波源时, 该指标因子就是所有其他谐波源影响下的数值.容 易看出,指标因子与其他谐波源电流、自身阻抗以 及系统参数都有关系.在这种情况下,仅仅依据该 谐波源支路的实际电流来区分谐波责任,实施惩罚 措施,显然并不具有说服力,该用户承担了没必要 承担的责任.定义耦合因子

$$\omega_{kj} = \lambda_k - \lambda_{kj} = \frac{I_{cj} \cdot Z'_{eq} \cdot Z''_{eq}}{U_{pcc} \cdot Z_{ck}}.$$
 (24)

此时计算的ω是谐波源*j*对谐波源*k*的影响大小,下面计算在所有谐波源同时存在的情况下,各谐波源 对某个谐波源影响因子的大小.

$$\Delta \lambda_k = \sum_{i=1, i \neq k}^n \xi_i \omega_i, \qquad (25)$$

此处 $\Delta \lambda_k = \lambda_k - \lambda'_k, \lambda_k$ 为由谐波源发射出的谐波 电流作用的指标因子, λ'_k 为其他所有谐波源加入之 后的指标因子, ω_i 为式(24)计算的某一个 ω , 即两两 之间的耦合因子, 那么 ξ_i 就是要计算的综合指标耦 合因子. 由此公式即可看出, 在其他谐波源的影响 下, 该谐波源对PCC 处谐波电压的贡献量, 发生了 明显的变化, 即谐波之间产生了耦合. 定义耦合强 弱因子

$$W = \frac{\lambda_k - \lambda_{kj}}{\lambda_k} = \frac{\dot{U}_{cj}}{\dot{U}_{ck}} \cdot \frac{Z'_{eq}}{Z_{cj} + Z'_{eq}} \cdot \frac{Z_{ck} + Z_{eq}}{Z_{ck}}.$$
(26)

此处定义 $W \in (0 \sim 0.1)$,表明耦合程度弱; $W \in (0.1 \sim 0.2)$,较弱; $W \in (0.2 \sim 0.4)$,较强; $W \in (0.4 \sim 1)$,强.

4 多谐波源的解耦方式及解耦目标(Decoupling method of multi-harmonic sources and decoupling target)

多谐波源解耦的目的就是通过采取相应的方式 改变多谐波源导纳矩阵,使式(1)的多谐波源耦合矩 阵中每个节点谐波电压只与该节点的谐波电流有 关,而不受上级电网的变压器、输电线路、受电端的 谐波传递影响.那么如何实现*n*节点的谐波电流*I_{nh}* 只与该节点谐波源的节点电压有关,通常的方式是 通过安装滤波装置来改变原来节点导纳方程,形成 新的节点导纳矩阵Y'_h.根据相关文献可知^[18–19],滤 波器导纳矩阵可以用公式描述如下:

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} \Delta Y_{11h} \ \Delta Y_{12h} \ \Delta Y_{13h} \ \cdots \ \Delta Y_{1nh} \\ \Delta Y_{21h} \ \Delta Y_{22h} \ \Delta Y_{23h} \ \cdots \ \Delta Y_{2nh} \\ \Delta Y_{31h} \ \Delta Y_{32h} \ \Delta Y_{33h} \ \cdots \ \Delta Y_{3nh} \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \ddots \qquad \vdots \\ \Delta Y_{m1h} \ \Delta Y_{m2h} \ \Delta Y_{m3h} \ \cdots \ \Delta Y_{mnh} \end{bmatrix}.$$
(27)

这样在城市电网多谐波源节点中增加滤波器后, 将产生节点导纳矩阵的变化.新的多谐波源模型将 满足*I*_h = *Y*_b'*U*_b', 其中:

$$\begin{split} Y_{\rm h}' &= Y_{\rm h} + \Delta Y, \\ I_{\rm h}' &= I_{\rm h} - I_{A{\rm h}} = I_{\rm h} - A_{\rm h} I_{\rm h} = \\ &I_{\rm h} (E - A_{\rm h}) = I_{\rm h} - A_{\rm h} I_{\rm h} = \\ &I_{\rm h} (E - A_{\rm h}). \end{split}$$

其中: *I*_{Ah}为滤波器治理电流, *A*_h为谐波电流治理系数. 这样式(2)的谐波电压将重新表示为

 $U'_{\rm h} = (Y_{\rm h} + \Delta Y)^{-1} (E - A_{\rm h}) I_{\rm h} = Z_{\rm h} I_{\rm h},$ (28) 式中:

$$Z_{\rm h} = (Y_{\rm h} + \Delta Y)^{-1} (E - A_{\rm h}),$$

E为单位矩阵.

解耦目标:

由式(1)的谐波源电流耦合系数 Y_h 可以看出它们 构成多变量、非线性强耦合系统,谐波电流有相关 性,形成相互干扰与耦合,给多谐波源的责任区分、 谐波源定位及治理带来不利影响.为了提高多谐波 源的治理效果及其电网的稳定性,需要安装治理装 置得到新的节点导纳矩阵,且满足关系式 $U'_h = (Y_h + \Delta Y)^{-1}(E - A_h)I_h$,即 $U'_h = Z_hI_h$.此时,如果能 够通过构造非线性关联矩阵P, Q来实现 $Z_h = (Y_h + \Delta Y)^{-1}(E - A_h)$ 对角化,则可实现多谐波源的解 耦^[20-21],其 Z_h 解耦目标展开形式如下:

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} \cdots & p_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} \cdots & Z_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \cdots & q_{1m} \\ q_{21} & q_{22} \cdots & q_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} \cdots & q_{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} z_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{22} z_{22} & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{mm} z_{mm} \end{bmatrix} .$$
(29)

由式(29)可知,由于新的导纳矩阵实现了对角 化,n节点的谐波电流I_{nh}只与该节点谐波源的节点 电压有关,这样谐波源各个接入点之间的谐波电流 耦合关系Y_h为0,这样本节点的谐波电流不对其他 节点产生影响,谐波电流不具备相关性,不需考虑 其他节点流入的谐波电流或者反送谐波补偿电流到 其他节点,实现了谐波责任区分、谐波源定位及谐 波治理的简单化.

5 谐波耦合机理案例分析 (Case analysis of harmonic coupling mechanism)

本案例以上海泗泾分区下的220 kV小环网为例, 其示意图如图5所示,利用上海市电能质量监测系 统实测数据来分析不同变电站之间的谐波影响系数 的取值.由图5知,该220 kV小环网共有9座220 kV 变电站,包括500 kV泗泾站的220 kV母线,共有10 条220 kV母线.

5.1 上级电网的谐波传导及耦合分析(Harmonic transmission and coupling analysis of the superior power network)

本数据是在泗泾站的500 kV母线上分别加 上2次至21次单位谐波源,分析谐波电压由泗泾站 500 kV母线沿着辐射型网络向低电压等级母线的传 递情况,从而得出泗泾站对小环网其他母线的影响 系数及谐波传递系统的计算结果.

由图6明显可以看出,随着站与站之间的电气距 离不同,其传递系数有所不同.此外,谐波在线路上 传输时,由于波的反射和折射会出现驻波效应,在 线路的某些点会导致谐波放大,甚至出现谐振的发 生.如新宜山110 kV至新宜山35 kV谐波传输时,7 次谐波和12次谐波的传递系数发生明显增大,可能 发生谐波放大现象.

5.2 输电线路传输距离同谐波传递及耦合分析 (Transmission distance with harmonic transmission coupling analysis)

为了分析谐波传递系数的影响,用MATLAB仿 真工具对图5所示案例进行拟合仿真,得到Th随l的 变化数据,如表1所示.由表1可知,对于不同次数的 谐波,输电距离对谐波传递系数的影响是不同的, 各次谐波的放大倍数随着与变电所距离的增加而逐 渐减小,谐波次数越高,在一段长度内发生谐波放 大的次数越多.

对表1做出折线图,如图7所示,从图中可以清晰 看出在5次、15次工频附近,谐波放大倍数发生明显 增大.但谐波电流放大的最大谐波次数随着长度的 增加而减小,这是因为随着线路的增长,分布电容 的作用突显出来,它与系统电抗发生谐振,在同样 的网络条件下,线路长度越长,并联电容值就越大, 电网谐振频率越低.因此,电网应根据线路长度的 不同采取相应的措施避免谐振的发生.

	衣 1 传迹系数计具值
Table 1	Calculation of transfer coefficient

たル

儿、治

	距离/km							
谐波次数	变电所	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
3	4.77	4.37	4.08	3.58	3.24	2.66	2.33	1.68
4	9.49	8.63	7.94	6.85	6.02	4.74	3.83	2.43
5	23.70	21.37	19.27	16.30	13.83	10.39	7.67	4.01
6	6.84	6.12	5.37	4.41	3.53	2.45	1.46	0.46
7	4.05	3.56	3.07	2.47	1.87	1.18	0.50	0.33
9	2.39	0.33	2.79	4.92	5.23	5.34	5.71	3.67
11	3.68	0.62	4.39	4.71	5.57	4.63	4.36	5.13
15	9.40	8.31	8.81	15.40	18.88	18.85	15.87	9.22
18	3.37	1.82	1.31	1.75	3.81	3.53	1.06	1.36
20	2.08	1.07	3.11	2.67	2.63	2.41	1.67	1.92

Fig. 7 Relation of harmonic magnification and harmonic frequency

5.3 受电端谐波源对谐波电流耦合及放大分析 (Harmonic current amplification and coupling analysis)

根据图5案例实际,选取正常运行方式,#2主变 电容器投退两种工况下,各条出线的11次和13次谐 波电压、谐波电流、谐波有功、谐波无功如表2-3所 示.表4为谐波阻抗计算值.

Table 2 Datas of the 11th harmonic										
时间参量	公日				距离	/km				上合田
		B2	B4	B6	B8	B10	B12	B14	B18	电谷器
3:00	U	387.7	387.7	387.7	387.7	387.7	387.7	391.3	391.3	391.3
	Ι	317.2	9.63	6.65	0.74	9.36	7.22	1.45	2.45	0
	P	317.2	1243	813.3	28.20	852.2	2.34	272.5	441.7	0
	Q	-1220	-3508	-2445	-283	-3519	-1942	-502	-852	0
	U	84.20	84.20	84.20	83.92	83.92	83.92	83.71	83.71	83.71
7.00	Ι	0.83	3.20	2.10	0.17	3.19	1.91	0.31	0.45	28.77
7.00	P	23.36	119.9	31.72	3.13	102.3	75.61	10.48	19.17	2.00
	Q	-65.7	-244.0	-173.0	-13.5	-246.6	-141.4	-24.0	-32.6	-2410

表 2 11次谐波各项数据 Fable 2 Datas of the 11th harmonic

Table 3 Datas of the 13th harmonic										
时间 参量	公日				距离	/km				上合田
	B2	B4	B6	B8	B10	B12	B14	B18	电谷器	
2.00	U	401.9	401.9	401.9	405.9	405.9	405.9	402.3	402.3	402.3
	Ι	3.251	9.948	6.608	0.687	8.196	8.862	1.412	1.737	0
5.00	P	322.1	1083.8	896.4	19.2	707.7	2035	308.7	326.7	0
	Q	-1266	-3841	-2520	-277	-3250	-2956	-476	-1052	0
	U	141.3	141.3	141.3	142.6	142.6	142.6	141.6	141.6	141.6
7.00	Ι	1.107	4.083	2.354	0.234	3.721	2.708	0.517	0.526	38.30
7.00	P	37.4	175.5	150.6	-0.5	180.3	128.3	44.3	21.7	-0.5
	Q	-151.3	-547.4	-298.6	-32.9	-500.4	-364.2	-58.1	-70.9	-5426

表 4	谐波	阻抗	计	笡值
/\~ T	11/1	1 minu		丌ഥ

Table 4 Calculation of harmonic impedance

11K 14 1/4 #/4	3:00电线	容器退出	7:00电容器投入			
谐波伏剱	11次	电容器退出 7:00电容器 13次 11次 17.11-65.81i 17.3-69.9i i 7.59-21.4i 5.96-18.59i i 10.38-31.22i 15.25-30.24i i 29.43-295.77i -5.6-343.68i 5.50-22.71i 7.33-20.34i 3i 21.90-20.91i 9.87-28.01i 7i 72.57-133.6i 93.7-122.79i ii 41.47-79.96i 44.44-145.27i - -2.09i -2.09i ii 2.13-5.06i 0.15-1.53i	13次			
B2	17.2–67.6i	17.11–65.81i	17.3–69.9i	19.27-54.19i		
B4	6.19-21.94i	7.59-21.4i	5.96-18.59i	6.56-13.34i		
B6	11.5-32.33i	10.38-31.22i	15.25-30.24i	4.08-22.26i		
B8	23.1-332.5i	29.43-295.77i	-5.6-343.68i	62.75-271.2i		
B10	5.94-27.3i	5.50-22.71i	7.33-20.34i	5.69-13.69i		
B12	14.65-21.28i	21.90-20.91i	9.87-28.01i	11.66-21.8i		
B14	87.5-134.87i	72.57-133.6i	93.7-122.79i	60.3-138.1i		
B18	24.6-79.19i	41.47-79.96i	44.44-145.27i	52.99-90.05i		
电容器	_	_	-2.09i	-1.64i		
总并联	1.89-5.19i	2.13-5.06i	0.15-1.53i	0.12-1.28i		

由表2-4可以看出,在电容器投切前后(3:00,7:00),B站8条出线的11次和13次谐波阻抗基本相同, 且为容性阻抗.斜土站#2的主变容量为20 MVA,阻抗为10.02%,计算归算到10 kV侧的基波阻抗为 0.501i,按照理想情况下的谐波阻抗计算方法, 其11次谐波阻抗约为5.5i,13次谐波阻抗约为6.5i, 属于感性.可以看出,在电容器退出时,在11次 和13次附近,斜土站#2主变的谐波阻抗与10 kV侧 各出线的谐波阻抗十分匹配,形成串联谐振的可能 性比较大.而在电容器投入时,这种阻抗匹配程度 较小.综上所述,在电容器退出时,#2主变的感性阻 抗和各条出线电缆的容性阻抗之间形成了串振匹 配,形成了11次和13次谐波的低阻通道,使得各条 出线谐波电流激增.而在电容器投入时,这种谐波 低阻通道被破坏,谐波含量骤减.

6 谐波解耦仿真分析(Simulation analysis of harmonic decoupling)

根据图5的城市电网案例,将其相关数据进行模拟,代入IEEE模型仿真节点,并按照本文所提解耦

思路进行解耦,用于仿真和分析解耦前后的谐波传 递系数及责任区分的变化关系.

解耦前后谐波传递系数对比分析.图8是解耦前后传递系数的对比图,虚线表示解耦前的传递系数,实线为解耦后的传递系数,由对比看出,解耦后,传递系数减小.传递系数与电气距离和谐波次数有很大关系.解耦之后,传递系数有所降低,即传输线路上级对下级的影响程度变小,有利于改善因谐振引起的谐波放大现象,使得下级线路及设备电压浮动变小,减少了线路损耗.

2) 解耦前后多谐波源责任区分对比分析. 根据 图5案例的相关参数, 并按照式(15)-(26), 可得耦合 因子如表5所示.

表5中: $H_1 \sim H_5$ 等表示各谐波源, ξ 表示各谐波 源之间耦合因子大小, –表示谐波源之间的耦合表 现为相互抵消, 反之, 则是相互增强. 根据本文耦合 强弱公式定义可知, 各谐波源与自身的耦合因子接 近于1, 与实际情况相符, 谐波源1, 3之间的耦合情 况相对严重, 谐波源5 对谐波源3 的耦合指标达到 -0.7,相互之间相互抵消了谐波影响,这种耦合关系的存在,使得谐波责任区分如果直接按照其对 PCC公共节点所发射的量,而不考虑谐波源之间的抵消和增强,则这样的量化不精确,谐波治理中设计滤波器的容量也不合理.

◆ 酒庄500kv至长春220kv ● 《春220kv至新量出Ⅱ

图 8 解耦前后500 kV母线至35 kV母线的传递系数

Fig. 8 Transfer coefficient from 500 kV bus to 35 kV bus before and after decoupling

根据表5的耦合因子,并根据文献[12]的责任区

分算法和本文的解耦策略,得到相应负荷在解耦前 后的责任区分值如表6-7所示.

Table 5 The coupling factor system of multi

harmonic sources

ξ	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
H_1	0.98	0.13	0.41	0.25	-0.43
H_2	0.18	0.99	0.22	0.16	-0.19
H_3	0.44	0.19	0.97	0.4	-0.7
H_4	0.17	0.08	0.22	0.98	-0.21
H_5	-0.36	-0.21	-0.40	-0.28	1.02

表6 解耦前谐波责任区分

Table 6 Decoupling of the former harmonicresponsibility

谐波次数	负荷1	的责任	负荷3	的责任	负荷5的责任		
	精确值	解耦前	精确值	解耦前	精确值	解耦前	
5	-18.34	-8.84	26.47	18.64	91.86	88.22	
7	-28.54	-27.69	29.87	27.17	98.67	102.19	
11	15.34	11.36	19.91	15.90	64.74	73.34	
13	19.42	15.23	17.60	13.52	62.97	66.74	

							I	8	
谐波次数	负荷1的责任			负荷3的责任			负荷5的责任		
	精确值	解耦前	解耦后	精确值	解耦前	解耦后	精确值	解耦前	解耦后
5	-18.34	-8.84	-17.10	26.47	18.64	25.74	91.86	88.22	90.99
7	-28.54	-27.69	-28.21	29.87	27.17	29.11	98.67	102.19	99.30
11	15.34	11.36	11.60	19.91	15.90	18.70	64.74	73.34	69.11
13	19.42	15.23	21.16	17.60	13.52	15.55	62.97	66.74	64.72

表 7 解耦后谐波责任区分 Table 7 The division of harmonic responsibility after decoupling

由表6可以看出,谐波源1的谐波责任在5,7次谐 波下为负数,是因为在关注母线PCC处,谐波源1产 生的谐波电压与谐波源3,5产生的谐波电压相位相 反,即削弱了谐波源3,5对关注母线电压的影响.如 在5次谐波下,谐波源3的谐波责任为负值,此非线 性负荷吸收了一部分谐波功率,抑制了谐波畸变.

按照解耦理论,解耦后的网络参数发生变化,因此互阻抗也将发生变化.鉴于此,责任区分也将发 生变化.解耦后的谐波责任区分结果见表7.

以5次谐波为例,由表7可以看出,负荷1在解耦前的责任大小为-8.84,与精确值-18.34比相差较大,而将谐波源解耦后,责任大小变为-17.10,与精确值更加接近.再比如13次谐波下,负荷13的责任由解耦前的66.74将为解耦后的64.72,与精确值的

差值变小,这说明通过本文的解耦理论,使得谐波 源与谐波源之间的耦合关系得到减弱或者解除,谐 波源之间的干扰减小,因此责任区分的大小更加接 近精确值.

7 结论(Conclusions)

本文对城市电网谐波电流的耦合机理进行了多 层次分析与研究,得出相关结论如下:

 1)城市电网中谐波电流的耦合不仅同本级电网 谐波源有关,还同上级电网的谐波传递、输电线路 的谐波传导、受电端放大与叠加有关;

 3)城市电网谐波电流的传输特性和谐振频率主要受线路长度、系统阻抗、网络分布参数等影响,且 谐波放大倍数与距离、谐波次数等有关系.随着谐 波次数和线路距离的增大,城市电网谐波传递系数 的阻抗和导纳与输电线路传递系数将发生变化,使 得变压器及输电线路的谐波传导与耦合效应已不能 被忽略;

3) 当系统中存在多个谐波源时,其他谐波源的 谐波电流会流入该谐波源支路.如果能够对多谐波 电流耦合模型进行解耦,有利于消除其他因数对实 际电流影响,更加有利于多谐波源责任区分与谐波 源定位的准确化.

参考文献(References):

 WU Tao, XIAO Jing. Analysis and countermeasures of city power grid harmonic [J]. *High Voltage Technology*, 2006, 32(10): 132 – 133.

(邬韬,肖静.城市电网谐波分析及治理对策 [J].高电压技术,2006, 32(10):132-133.)

- [2] DE MELO I D, PEREIRA J L R, VARIZ A M. Harmonic state estimation for distribution systems based on synchrophasors [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 978 – 986.
- [3] MENG L, TANG F, SAVAGHEBI M, et al. Tertiary control of voltage unbalance compensation for optimal power quality in islanded microgrids [J]. *IEEE Transactions Energy Converse*, 2014, 29(4): 802 – 815.
- [4] XU Changbo, LI Chunwen, LU Wei. Adaptive fuzzy control for active power filter with distributed generators [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(1): 100 104.
 (徐长波,李春文,鲁伟.带分布式电源的有源滤波器的模糊自适应 控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(1): 100 104.)
- [5] LI Y, LUO L, CHRISTIAN R, et al. Simulation of the electromagnetic response characteristic of an inductively filtered HVDC converter transformer using field-circuit coupling [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(11): 4020 – 4031.
- [6] LIU Shuming, XU Yonghai, ZHU Yongqiang, et al. Impact of transmission line parameters on Harmonic transmission coefficients in 1000 kV AC power transmission system [J]. *Power System Technolo*gy, 2010, 34(1): 11 – 14.

(刘书铭, 徐永海, 朱永强, 等. 特高压线路参数对线路谐波传递系数 的影响 [J]. 电网技术, 2010, 34(1): 11 – 14.)

- [7] BRENNA M, FOIADELLI F. Sensitivity analysis of the constructive parameters for the 2×25 kV high-speed railway lines planning [J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1923 – 1931.
- [8] ZHE Zhengyou, HU Haitao, FANG Lei, et al. Research on the Harmonic in high-speed railway traction power supply system and its transmission characteristic [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(16): 55 – 62. (何正友, 胡海涛, 方雷, 等. 高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特

(可止及, 明海海, 万亩, 寺. 同逐铁超华 引供电系统诸波及英传播符 性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 55 – 62.)

- [9] LI Y, LIU F, LUO L, et al. Enhancement communication reliability of an HVDC inverter by means of an inductive filtering method [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(11): 4917 – 4929.
- [10] HASHEMPOUR M M, SAVAGHEBI M, VASQUEZ J C, et al. A control architecture to coordinate distributed generators and active power filters coexisting in a microgrid [J]. *IEEE Transaction Smart Grid*, 2015, 6(1): 1 – 12.
- [11] TERCIYANLI A, ERMIS M, CADIRCI I. A selective harmonic amplification method for reduction of kVA rating of current source converters in shunt active power filters [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1): 65 – 78.

- [12] YANG Yuan, LIN Sheng, ZANG Tianlei, et.al. Improved sparse representation-based location of harmonic sources in power system [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(5): 1279 1284.
 (杨源, 林圣, 臧天磊, 等. 基于改进稀疏表示法的谐波源定位 [J]. 电 网技术, 2013, 37(5): 1279 1284.)
- [13] GU Zhifeng, ZHU Changqing, SHAO Tianzhang, et al. Robust adaptive control for the excitation system based on total-state-parameter optimum control [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(7): 856 862.
 (谷志锋,朱长青,邵天章,等. 全状态参数最优控制的鲁棒自适应励 磁控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(7): 856 862.)
- [14] YONG J, CHEN L. Modeling of home sappliances for power distributed system harmonic analysis [J]. *IEEE Transations on Power Delivery*, 2010, 25(4): 3147 – 3155.
- [15] JIA Xiufang, HUA Huichun, CAO Dongsheng, et al. Determining harmonic contributions based on complex least squares method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(4): 149 – 155.
 (贾秀芳, 华回春, 曹东升, 等. 基于复线性最小二乘法的谐波责任定 量划分 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 149 – 155.)
- [16] QIAN Chenchen, ZHU Mingxing, XIA Zhenwu, et al. Quantitative e-valuation for responsibility proration among multiple three-phase unbalanced sources based on reference impedance method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 61 67.
 (钱辰辰,朱明星,夏振武,等. 基于参考阻抗法的多不平衡源责任分 摊定量评估 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 61 67.)
- [17] ZHENG Lianqing, WU Ping, LI Kun. Modeling method for power system harmonics [J]. *Power System Technology*, 2010, 34(8): 41 – 45. (郑连清, 吴萍, 李鹍. 电力系统中谐波源的建模方法 [J]. 电网技术, 2010, 34(8): 41 – 45.)
- [18] LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. Nonlinear Control of Power System [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2008: 86 – 108. (卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 清华大学 出版社, 2008: 86 – 108.)
- [19] WAKILEH G J. A Basic Principle of Power System Harmonic Analysis Method and Filter Design [M]. XU Zheng translated. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003: 35 76.
 (WAKILEH G J. 电力系统谐波一基本原理、分析方法和滤波器设计 [M]. 徐政,译. 北京: 机械工业出版社, 2003: 35 76.)
- [20] WANG Ben, HUANG Chongxin, LI Tai, et al. Inverse-system control scheme for unified-power-flow controller [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(5): 551 556.
 (王奔, 黄崇鑫, 李泰, 等. 统一潮流控制器逆系统方法控制策略 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 551 556.)
- [21] LU Wei, LI Chunwen, XU Changbo. Inverse system method based decoupling control of shunt hybrid active power filter [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(9): 1145 1152.
 (鲁伟, 李春文, 徐长波. 并联混合有源滤波器逆系统解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(9): 1145 1152.)

作者简介:

江友华 (1974-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为谐波、电能质 量及电力系统自动化, E-mail: jyhua0306@sina.com;

钱 彦 (1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其 自动化, E-mail: 462856618@qq.com;

曹以龙 (1965--), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力电子、电力系统及其自动化, E-mail: caoyilong2004@126.com.