

基于末端微电网结构的配电网系统 谐波抑制策略研究

孙孝峰, 蔡 瑶, 马 群, 李 昕, 沈 虹

(燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘 要: 基于电压控制方式(voltage-controlled method, VCM)的微电网接入配电线末端后, 线路末端对谐波近似呈短路特性。由于功率因数校正电容与系统电感之间的谐振, 背景谐波可能被严重放大, 威胁系统设备安全。针对系统的背景谐波放大问题, 提出一种分频阻性有源滤波器(discrete frequency resistive active power filter, DFRAPF)谐波抑制策略, 即在距离配电线末端主要次谐波 1/4 波长的位置, 针对相应次谐波安装与线路特征阻抗匹配的阻性有源滤波器(resistive active power filter, RAPF)。该策略可有效抑制基于末端微电网结构的配电网系统中的背景谐波放大现象, 减小电压畸变。仿真与实验结果验证了该策略的有效性。

关键词: 微电网; 配电线; 背景谐波放大; DFRAPF; 谐波抑制

中图分类号: TM46

文献标识码: A

0 引 言

随着电力电子装置的普遍应用, 配电网系统中谐波污染问题受到广泛关注。其中, 功率因数校正电容与系统电感之间谐振造成的背景谐波放大问题, 严重降低供电质量, 影响电气设备正常运行, 甚至损坏设备, 引起安全事故。配电网系统的背景谐波主要包括上级电网渗透的谐波电压和本级电网非线性负载注入的谐波电流^[1]。

针对背景谐波放大问题, 文献[2]提出在配电线路末端安装与特征阻抗匹配的阻性有源滤波器(resistive active power filter, RAPF)抑制谐波放大, 但其抑制效果会受线路参数变化影响。因此, 文献[3]提出一种等效无限长有源电力滤波器, 不仅抑制效果更优, 而且对线路参数变化的适应性更强。而文献[4]提出一种自动调节增益的有源滤波器, 可在线路参数未知的情况下实现较好的滤波性能, 但由于其对各次谐波采用相同的电导增益系数, 存在“打鼹鼠”现象。文献[5, 6]提出分频控制 RAPF, 通

过分频动态调节增益或分频位置选择, 有效避免了“打鼹鼠”现象。文献[7]提出多个 RAPF 协同控制, 该系统需要通信环节, 成本较高。为避免通信环节, 文献[8, 9]提出基于下垂控制的多 RAPF 系统, 有效抑制了背景谐波放大。

微电网的发展给谐波抑制带来新的挑战。微电网由多个分布式发电(distributed generation, DG)单元和用户负荷构成, DG 单元通常采用基于电压控制方式(voltage-controlled method, VCM)的下垂控制实现“即插即用”特性^[10, 11]。基于 VCM 的微电网表现为电压源, 接入配电网末端后, 配电线末端对谐波近似呈短路特性^[12, 13]。而文献[2~9]中所提策略都是针对配电线末端空载或带载的情况, 线路末端对谐波表现为开路或阻抗特性。因此, 以上策略中滤波器的安装位置均不适用于基于末端微电网结构的配电网系统。针对此系统, 可考虑将 RAPF 功能嵌入到基于 VCM 的 DG 单元逆变器的控制中, 但 DG 单元的安装位置由微电网系统的实际需求决定, 可能导致不理想的谐波抑制效果^[13, 14]。

收稿日期: 2016-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900300); 国家自然科学基金(51677162); 河北省自然科学基金(E2017203337; E2018203174)

通信作者: 孙孝峰(1970—), 男, 博士、教授, 主要从事变流器拓扑及波形控制技术、功率因数校正与有源滤波技术、新能源变换与组网技术方面的研究。sxf@ysu.edu.cn

本文针对基于末端微电网结构的配电网系统,建立双端电压源模型,分析背景谐波电压在配电线上的驻波规律,并提出 DFRAPF 谐波抑制策略:在距离配电线末端主要次谐波 1/4 波长的位置,针对相应次谐波安装与线路特征阻抗匹配的 RAPF。该策略可有效抑制系统中上级电网渗透和本级电网注入的背景谐波的放大现象。仿真和实验结果均验证所提策略的正确性和有效性。

1 背景谐波放大问题分析

基于末端微电网结构的配电网系统模型如图 1 所示,电网等效电压源位于配电线始端中压 (medium voltage, MV) 母线处,整个微电网系统位于配电线末端公共耦合点 (point of common coupling, PCC) 处。在微电网系统中,基于 VCM 的 DG 单元可等效为一个电压源串联阻抗的模型^[12]。 n 个 DG 单元并联后的等效模型仍为电压源串联阻抗,但考虑到该等效阻抗为 n 个 DG 单元等效阻抗的并联结果,其值很小,故本文忽略其影响,将整个微电网系统等效为一个电压源置于 PCC 处,此时配电线的集总参数模型可简化为图 2。

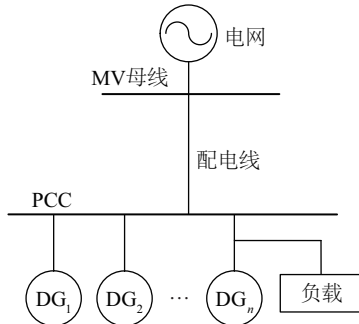


图1 基于末端微电网结构的配电网系统模型

Fig. 1 Model of power distribution system based on end microgrid structure

图 2 中假设配电线路上的电阻、电感和电容均匀分布,线路空载、无支路,且其中 V_g 、 V_{pcc} 分别表示电网和微电网的等效电压源。线路参数如表 1 所示,该参数基于日本一个 6.6 kV、3 MVA 的实际配电线,为模拟远距离配电线,其长度延长至 9 km^[2]。

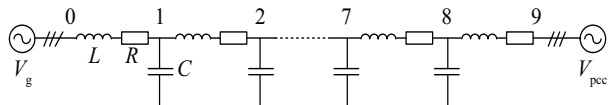


图2 配电线集总参数模型

Fig. 2 Lumped-parameter model of the feeder

表1 线路参数

Table 1 Circuit parameters

参数	取值	参数	取值
基波频率 f/Hz	50	线路电感 $L/\text{mH}\cdot\text{km}^{-1}$	1.98
线路长度 l/km	9	线路电容 $C/\mu\text{F}\cdot\text{km}^{-1}$	25
线路分段数 n	9	线路电阻 $R/\Omega\cdot\text{km}^{-1}$	0.36

配电线的特征阻抗为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \quad (1)$$

传播常数为:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)j\omega C} = \alpha + j\beta \quad (2)$$

波长为:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (3)$$

式中, α ——衰减系数; β ——相位移系数; ω ——角频率。

图 3 为当配电网始端(节点 0)存在上级电网渗透而来的 h 次背景谐波电压源 V_h 时,配电线的等效分布参数模型。配电线始端为 V_h , 末端对谐波短路。

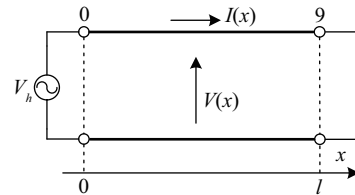


图3 V_h 存在时配电线分布参数模型

Fig. 3 Distributed-parameter model of feeder when V_h exists

图 3 中, l 表示配电线长度,此处为 9 km, x 表示距节点 0 的距离, $V(x)$ 与 $I(x)$ 分别表示 x 处的谐波电压和谐波电流, $V(x)$ 如式(4)所示。

$$V(x) = \frac{\sinh[\gamma_h(l-x)]}{\sinh(\gamma_h l)} V_h \quad (4)$$

定义谐波电压放大倍数为:

$$M(x) = \frac{|V(x)|}{|V(0)|} \quad (5)$$

当 V_g 中 5 次或 7 次谐波电压含量为 2% 时,由式(4)和式(5)可得图 3 分布参数模型中各点的谐波电压放大倍数,通过仿真可得图 2 集总参数模型中各节点的谐波电压放大倍数,结果如图 4。图中,“—”和“—”代表分布参数模型的理论计算结果,“×”和“○”代表集总参数模型的仿真结果。

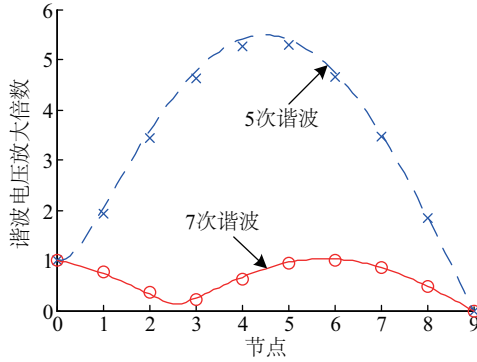
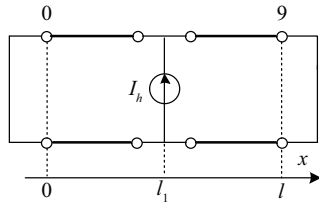


图4 配电线上谐波电压放大倍数

Fig. 4 Harmonic voltage-magnifying factors along the feeder

分析图4可得,分布参数模型与集总参数模型保持一致,5次和7次谐波电压分别在配电线上形成驻波,线路末端为驻波波节。因此,根据传输线理论,当 l 满足 $l \leq \lambda_h/4$ 或 $l = (2m-1)\lambda_h/4$ 时,谐波源位于驻波波腹处,对应次谐波不会被放大(λ_h 为 h 次谐波波长);当 $l = m\lambda_h/2$ 时,谐波源位于驻波波节处,对应次谐波在配电线上的放大问题最严重(m 为正整数)。对于9 km 配电线,其长度近似等于5次谐波波长 λ_5 的1/2和7次谐波波长 λ_7 的3/4,故图4中5次谐波被严重放大,而7次谐波不存在放大现象。

图5为当配电网中含非线性负载引入的谐波电流源 I_h 时,配电线的等效分布参数模型。图中 I_h 位于距离配电线始端 l_1 处,此时线路上任一点 x 处的谐波电压 $V(x)$ 如式(6)所示。

图5 I_h 存在时配电线分布参数模型Fig. 5 Distributed-parameter model of feeder when I_h exists

$$V(x) = \begin{cases} \frac{\sinh[\gamma_h(l-l_1)]}{\sinh(\gamma_h l)} Z_c I_h \sinh(\gamma_h x), & 0 \leq x \leq l_1 \\ \frac{\sinh[\gamma_h(l-x)]}{\sinh(\gamma_h l)} Z_c I_h \sinh(\gamma_h l_1), & l_1 < x \leq l \end{cases} \quad (6)$$

设 V_g 中基波电压为 V_f ,定义谐波电压畸变率:

$$D(x) = \frac{|V(x)|}{|V_f|} \times 100\% \quad (7)$$

当 V_g 中不含谐波,而线路上节点5($l_1=5$ km)处存在5次谐波电流源 $I_5=1$ A或节点3($l_1=3$ km)处存在7次谐波电流源 $I_7=1$ A时,由式(6)和式(7)可得分布参数模型中线路各点的谐波电压畸变率,通过仿真可得集总参数模型中各节点的谐波电压畸变率,结果如图6。

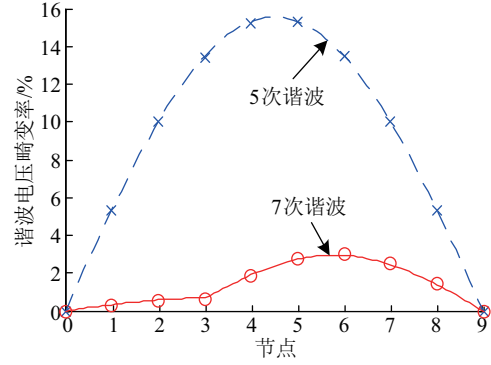


图6 配电线上谐波电压畸变率

Fig. 6 Harmonic voltage-distortion rates along the feeder

由式(6)和图6可看出,此时谐波电压驻波分为两段,分别位于谐波电流源的上游和下游,配电线两端节点分别为两段驻波的波节,谐波放大问题仍存在。分析式(6)可得:当 $l = (2m-1)\lambda_h/4$ 时,配电线上各点的对应次谐波电压畸变率均较低;当 $l = m\lambda_h/2$ 时,配电线上的对应次谐波电压畸变问题最严重。并且图6的仿真结果与该结论保持一致,验证了其正确性。

2 DFRAPF谐波抑制策略

针对远距离配电线($l > \lambda_h/4$)可能存在的背景谐波放大问题,本文提出(discrete frequency resistive active power filter, DFRAPF)谐波抑制策略,即在距离配电线末端主要次谐波1/4波长的位置,针对相应次谐波安装与线路特征阻抗 Z_c 匹配的RAPF。该策略中RAPF的安装位置是基于传输线理论确定的,在其安装节点前对谐波实现阻抗匹配^[2],安装节点后实现谐波衰减。当配电线上存在不同的背景谐波源时,该策略的谐波抑制效果需具体分析。

2.1 上级渗透的背景谐波抑制

当配电线始端存在上级渗透而来的谐波电压源 V_h 时,安装DFRAPF后配电线的分布参数模型如

图 7 所示。图 7 中 Z_{eq} 为 $(l - \lambda_h/4) \sim l$ 段包括 Z_c 的等效阻抗, 线路上任一点 x 处谐波电压 $V(x)$ 如式(8)所示。

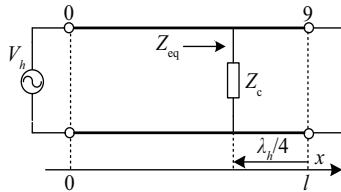


图 7 V_h 存在时安装 DFAPF 的分布参数模型

Fig. 7 Distributed-parameter model with DFAPF when V_h exists

$$V(x) = \begin{cases} \frac{Z_{eq} \cosh[\gamma_h(l - \lambda_h/4 - x)] + Z_c \sinh[\gamma_h(l - \lambda_h/4 - x)]}{Z_{eq} \cosh[\gamma_h(l - \lambda_h/4)] + Z_c \sinh[\gamma_h(l - \lambda_h/4)]} V_h, & 0 \leq x \leq l - \lambda_h/4 \\ \frac{\sinh[\gamma_h(l - x)]}{\sinh(\gamma_h \lambda_h/4)} V(l - \lambda_h/4), & l - \lambda_h/4 < x \leq l \end{cases} \quad (8)$$

对于无损均匀配电线, β_h 满足:

$$\gamma_h = j\beta_h \quad (9)$$

$$Z_c = \sqrt{L/C} = 8.9 \Omega \quad (10)$$

此时 Z_{eq} 表达式为:

$$Z_{eq} = Z_c \parallel jZ_c \tan(\beta_h \lambda_h/4) = Z_c \parallel j\infty = Z_c \quad (11)$$

则配电线上任一点 x 处谐波电压放大倍数为:

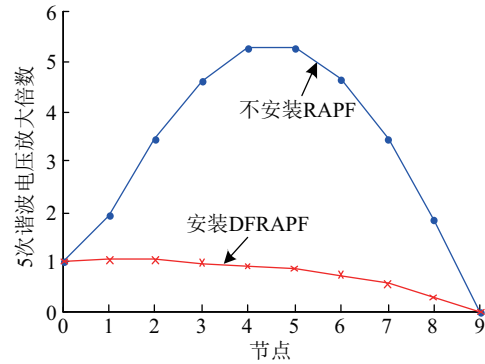
$$M(x) = \begin{cases} \left| \frac{\cos[\beta_h(l - \lambda_h/4 - x)] + j \sin[\beta_h(l - \lambda_h/4 - x)]}{\cos[\beta_h(l - \lambda_h/4)] + j \sin[\beta_h(l - \lambda_h/4)]} \right| = 1, & 0 \leq x \leq l - \lambda_h/4 \\ |\sin[\beta_h(l - x)]|, & l - \lambda_h/4 < x \leq l \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知, 在 $0 \leq x \leq l - \lambda_h/4$ 段, $M(x)$ 为恒值 1; 在 $l - \lambda_h/4 < x \leq l$ 段, $M(x)$ 从 1 正弦衰减到 0。

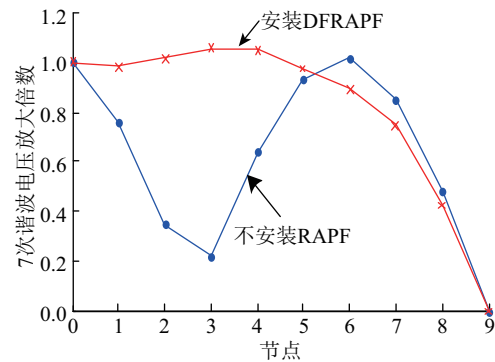
根据图 2 搭建配电线的集总参数仿真模型, 对应 5 次谐波的 DFAPF 安装在节点 5, 而对应 7 次谐波的 DFAPF 安装在节点 6。当节点 0 处 5 次和 7 次谐波电压含量均为 2% 时, 谐波电压放大倍数在 不安装 RAPF 和安装 DFAPF 2 种情况下的仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可得, 安装 DFAPF 后, 对于 5 次谐波, 谐波电压放大倍数在节点 5 之前近似为 1, 之后正弦衰减为零; 对于 7 次谐波, 谐波电压放大倍数在

节点 6 之前近似为 1, 之后正弦衰减为零。由于仿真基于有损配电线模型, 故与式(12)结果存在微小偏差。



a. 5 次谐波



b. 7 次谐波

图 8 配电线上谐波电压放大倍数仿真结果

Fig. 8 Simulation results of harmonic voltage-magnifying factors along the feeder

由图 4 分析知, 长度为 9 km 的配电线上 7 次谐波电压不会被放大, 由图 8b 可见, 在安装 DFAPF 后部分节点谐波电压增大。但 DFAPF 是针对满足 $l > \lambda_h/4$ 的任意长度配电线上的谐波放大问题, 具有普遍适用性。故分布参数模型分析和集总参数模型仿真结果均可表明, DFAPF 谐波抑制策略可实现抑制上级电网渗透的背景谐波电压在配电线上的放大。

2.2 本级注入的背景谐波抑制

当在配电线上距离始端 l_1 处存在本级负载注入的谐波电流源 I_h 时, 需考虑 2 种情况:

1) $0 < l_1 \leq l - \lambda_h/4$, 即 I_h 位于节点 0 与 DFAPF 安装节点之间。

此时, 安装 DFAPF 后, 配电线的分布式参数模型如图 9 所示, Z_{eq} 为 $(l - \lambda_h/4) \sim l$ 段包括 Z_c 的等效

阻抗,线路上任一点 x 处谐波电压 $V(x)$ 的如式(13)所示。

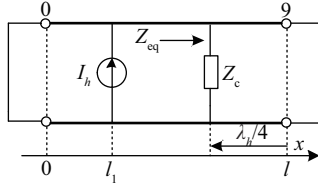


图9 I_h 位于节点0与DFRAPF安装节点之间时分布参数模型

Fig. 9 Distributed-parameter model when I_h exists between bus 0 and installation bus of DFRAPF

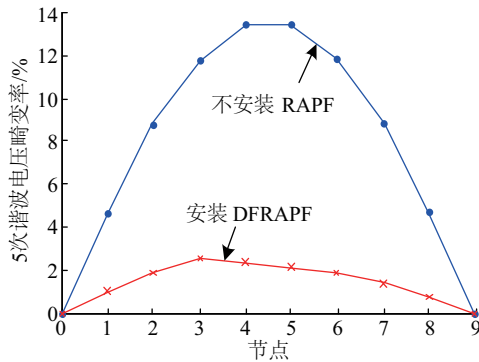
$$V(x) = \begin{cases} \frac{Z_{eq} \cosh[\gamma_h(l - \lambda_h/4 - l_1)] + Z_c \sinh[\gamma_h(l - \lambda_h/4 - l_1)]}{Z_{eq} \cosh[\gamma_h(l - \lambda_h/4)] + Z_c \sinh[\gamma_h(l - \lambda_h/4)]} I_h Z_c \sinh(\gamma_h x), & 0 \leq x \leq l_1 \\ \frac{Z_{eq} \cosh[\gamma_h(l - \lambda_h/4 - x)] + Z_c \sinh[\gamma_h(l - \lambda_h/4 - x)]}{Z_{eq} \cosh[\gamma_h(l - \lambda_h/4)] + Z_c \sinh[\gamma_h(l - \lambda_h/4)]} I_h Z_c \sinh(\gamma_h l_1), & l_1 < x \leq l - \lambda_h/4 \\ \frac{\sinh[\gamma_h(l - x)]}{\sinh(\gamma_h \lambda_h/4)} V(l - \lambda_h/4), & l - \lambda_h/4 < x \leq l \end{cases} \quad (13)$$

考虑无损配电线,依据式(9)~式(11),可得此时间线上各点谐波电压畸变率,如式(14)所示。

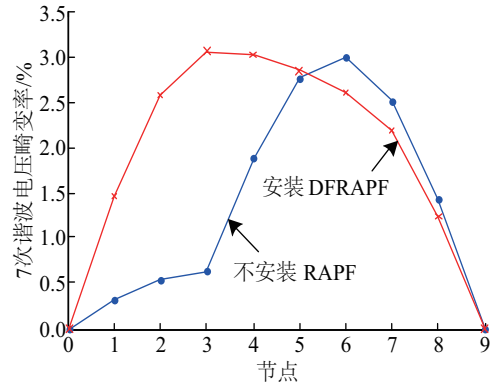
$$D(x) = \begin{cases} |I_h Z_c \sin(\beta_h x)/V_l|, & 0 \leq x \leq l_1 \\ |I_h Z_c \sin(\beta_h l_1)/V_l|, & l_1 < x \leq l - \lambda_h/4 \\ |I_h Z_c [\sin \beta_h(l - x)] \sin(\beta_h l_1)/V_l|, & l - \lambda_h/4 < x \leq l \end{cases} \quad (14)$$

分析式(14)可知,在 $0 \leq x \leq l_1$ 段, $D(x)$ 的波形为正弦曲线;在 $l_1 < x \leq l - \lambda_h/4$ 段, $D(x)$ 为恒值;在 $l - \lambda_h/4 < x \leq l$ 段, $D(x)$ 正弦衰减到0。

图10a为 $I_{h5} = 1$ A 位于节点3时的仿真结果,安装DFRAPF后, $D(x)$ 在节点0~3段和节点5~9段



a. 5次谐波



b. 7次谐波

图10 I_h 位于节点3时谐波电压畸变率仿真结果

Fig. 10 Simulation results of harmonic voltage-distortion rates when I_h exists on bus 3

均为正弦曲线,节点3~5段略微下垂。图10b为 $I_{h7} = 1$ A 位于节点3时的仿真结果,安装DFRAPF后, $D(x)$ 在节点0~3段和节点6~9段均为正弦曲线,节点3~6段略微下垂。仿真结果与式(14)保持一致。故分布参数模型分析和集总参数模型仿真结果都可表明,当本级负载注入的谐波电流源位于 $0 < l_1 \leq l - \lambda_h/4$ 时,DFRAPF 谐波抑制策略可将配电线上的各次谐波电压畸变率均抑制在较低水平。

2) $l - \lambda_h/4 < l_1 < l$, 即 I_h 位于DFRAPF安装节点与节点9之间。

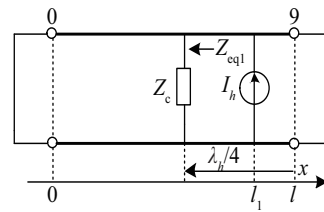


图11 I_h 位于DFRAPF安装节点与节点9之间时分布参数模型

Fig. 11 Distributed-parameter model when I_h exists between installation bus of DFRAPF and bus 9

图11为此时安装DFRAPF后配电线的分布式参数模型,其中 Z_{eq1} 为0~ $(l - \lambda_h/4)$ 段包括 Z_c 的等效阻抗。对于无损均匀配电线, Z_{eq1} 为:

$$\begin{aligned} Z_{eq1} &= Z_c \parallel j Z_c \tan(\beta_h l - \pi/2) \\ &= Z_c \cos(\beta_h l) [(\cos(\beta_h l) - j \sin(\beta_h l))] \end{aligned} \quad (15)$$

则线路上各点谐波电压畸变率为:

$$D(x) = \begin{cases} \left| \frac{\sin \beta_h x \cdot \sin[\beta_h(l-l_1)]}{\cos(\beta_h l)} I_h Z_{eq1} / V_f \right|, & 0 \leq x \leq l - \lambda_h / 4 \\ \left| \sin[\beta_h(l-l_1)] \{ Z_{eq1} \sin[\beta_h(l-x)] + j Z_c \cos[\beta_h(l-x)] \} I_h / V_f \right|, & l - \lambda_h / 4 < x \leq l_1 \\ \left| \sin[\beta_h(l-x)] \{ (Z_{eq1} \sin \beta_h(l-l_1)) + j Z_c \cos[\beta_h(l-l_1)] \} I_h / V_f \right|, & l_1 < x \leq l \end{cases} \quad (16)$$

分析式(15)和式(16)可知,在 $0 \leq x \leq l - \lambda_h / 4$ 段和 $l_1 < x \leq l$ 段, $D(x)$ 波形为正弦曲线;在 $l - \lambda_h / 4 < x \leq l_1$ 段,当 $l = m\lambda_h / 2$ 时, $Z_{eq1} = Z_c$, $D(x)$ 为恒值,而当 $l = (2m-1)\lambda_h / 4$ 时, $Z_{eq1} = 0$, $D(x)$ 波形呈余弦上升。

图 12a 为 $I_{h5} = 1$ A 位于节点 7 时的仿真结果,由于配电线长度等于 $\lambda_5 / 2$,故安装 DFRAPF 后, $D(x)$ 在节点 0~5 段和节点 7~9 段都是正弦曲线,而在节点 5~7 段保持不变。图 12b 为 $I_{h7} = 1$ A 位于节点 7 时的仿真结果,由于配电线长度等于 $3\lambda_7 / 4$,故安装

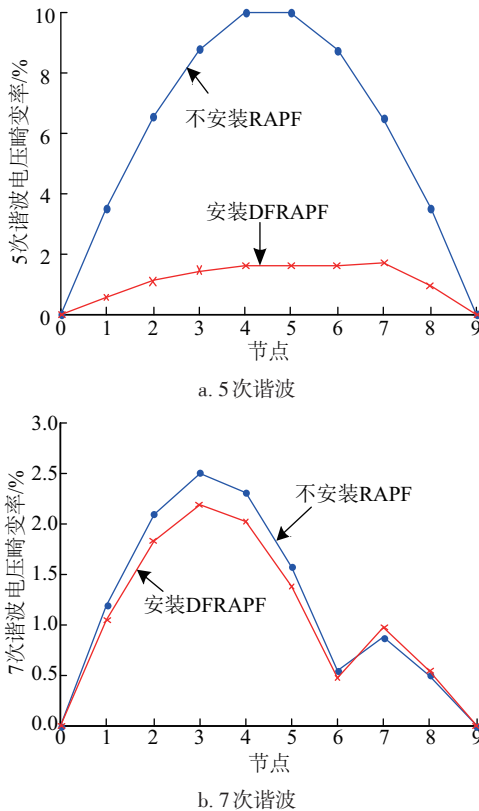


图 12 I_h 位于节点 7 时谐波电压畸变率仿真结果
Fig. 12 Simulation results of harmonic voltage-distortion rates when I_h exists on bus 7

DFRAPF 后, $D(x)$ 在节点 0~6 段和节点 7~9 段都是正弦曲线,而在节点 6~7 段上升。

图 12 中的集总参数模型仿真结果与式(16)的分布参数模型分析保持一致,均表明 DFRAPF 谐波抑制策略可实现本级负载注入的谐波电流源位于 $l - \lambda_h / 4 < l_1 < l$ 时的背景谐波放大抑制。

综上,本级负载注入的谐波电流源位于不同位置时,DFRAPF 的谐波抑制效果不同。虽然有些情况下安装 DFRAPF 后,部分节点畸变会被放大,但只要谐波电流源较轻,配电线上所有节点的各次谐波电压畸变率在任何情况下均可维持在较低水平。

3 实验验证

为验证所提新策略的有效性,根据图 2 搭建单相 50 Hz 的 9 km 配电线模拟平台,配电线的节点 0 和节点 9 处均为电压源。实验中配电线的电路参数如表 2 所示。

表 2 实验中配电线电路参数

Table 2 Experimental circuit parameters of the feeder

电感/mH	数值	电容/ μ F	数值	电阻/ Ω	数值
L_1	1.93	C_1	23.5	R_1	0.5
L_2	1.87	C_2	21.6	R_2	0.5
L_3	1.98	C_3	24.3	R_3	0.5
L_4	2.00	C_4	24.2	R_4	0.5
L_5	1.96	C_5	22.9	R_5	0.5
L_6	1.94	C_6	20.1	R_6	0.5
L_7	2.04	C_7	25.2	R_7	0.5
L_8	1.99	C_8	23.7	R_8	0.5
L_9	1.99	C_9	24.7	R_9	0.5

图 13 和图 14 分别给出当节点 0 处电压源含 5% 的 5 次谐波和 5% 的 7 次谐波时,节点 3~节点 6 处的电压波形图。其中,图 13a、图 14a 以及图 13b、图 14b 分别为不安装 RAPF 和安装 DFRAPF 这 2 种情况下的电压波形图。图 13a 中的各节点电压波形畸变严重,5 次谐波含量很大,而图 14a 中的各节点电压波形接近正弦波,7 次谐波含量很小,与之前分析一致,即 5 次谐波的放大问题很严重,而 7 次谐波不存在放大现象。图 13b 中电压波形与图 13a 相比有明显改善,图 14b 中电压波形与

图 14a 相比虽未改善,但谐波含量仍较小。

对 9 km 配电线在无 RAPF 和安装 DFRAPF 的 2 种情况下的各节点电压波形进行傅里叶分析,可得到各节点 5 次谐波和 7 次谐波的电压放大倍数,如图 15 所示。图 15 的实验结果与图 8 仿真结果一致,验证了 DFRAPF 谐波抑制策略可有效抑制上级电网渗透的背景谐波的放大现象。

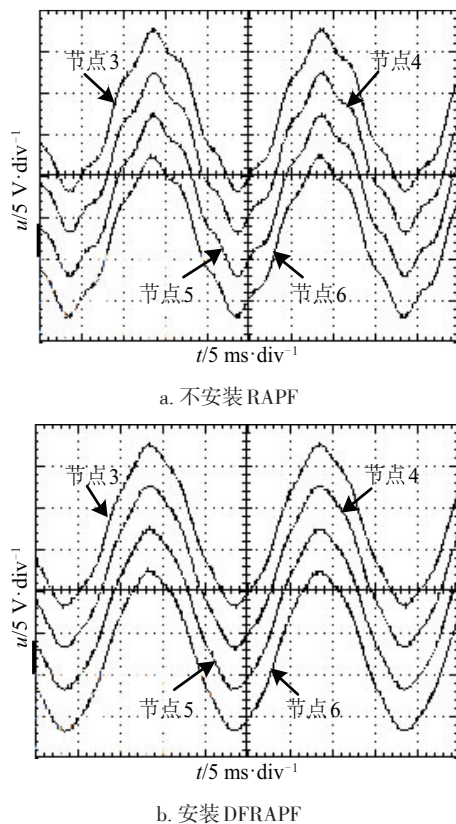
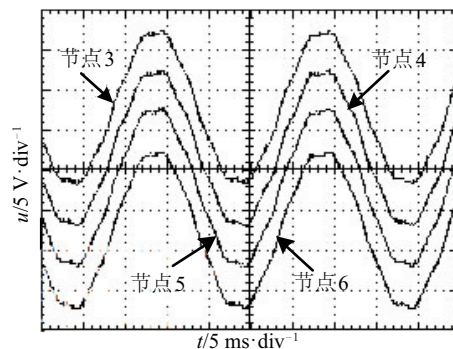
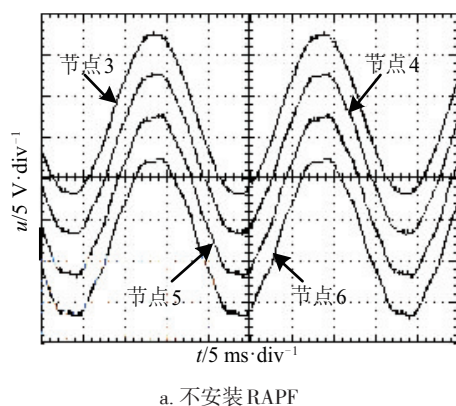


图 13 节点 0 存在 5 次谐波电压源时节点 3~节点 6 处的电压波形

Fig. 13 Voltage waveforms of bus 3, 4, 5, and 6 when the 5th-harmonic voltage source exists on bus 0



b. 安装 DFRAPF

图 14 节点 0 存在 7 次谐波电压源时节点 3~节点 6 处的电压波形

Fig. 14 Voltage waveforms of bus 3, 4, 5, and 6 when the 7th-harmonic voltage source exists on bus 0

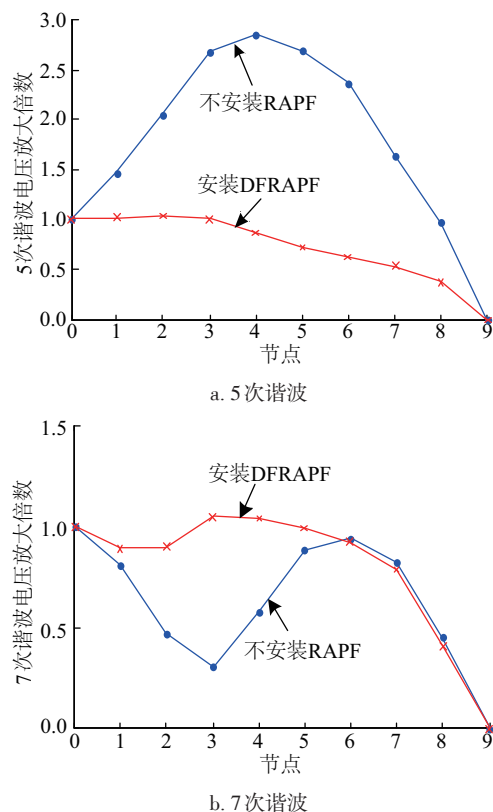


图 15 配电线上谐波电压放大倍数实验结果

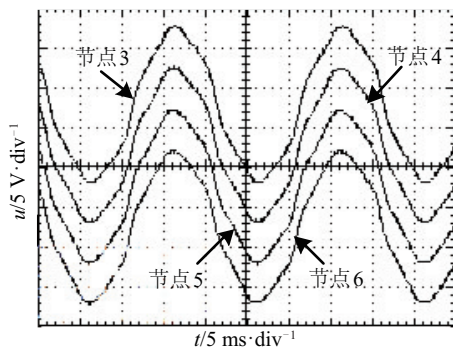
Fig. 15 Experimental results of harmonic voltage-magnifying factors along the feeder

图 16 和图 17 分别给出节点 3 和节点 7 处存在非线性负载时节点 3~节点 6 处的电压波形图。其中,图 16a、图 17a 以及图 16b、图 17b 分别为不安装 RAPF 和安装 DFRAPF 这 2 种情况下的电压波形图。此处采用二极管不控整流模块作为非线性

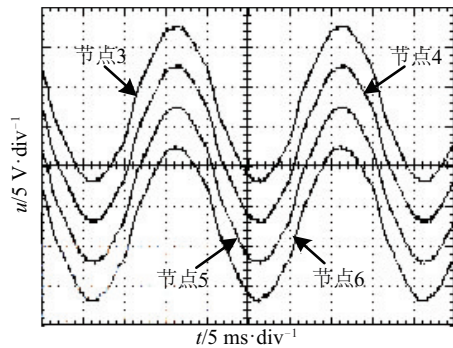
负载,向线路注入谐波电流。该模块的直流侧为阻感性负载,电阻值为 $12.5\ \Omega$,电感值 $0.91\ \text{H}$ 。

由图 16 和图 17 可看出,当非线性负载位于节点 3 或节点 7 时,安装 DFRAPF 的情况与不安装 RAPF 的情况相比,各节点电压波形均有所改善。

图 18 和图 19 分别给出节点 3 和节点 7 处在非线性负载时,不安装 RAPF 和安装 DFRAPF 这 2 种情况下各节点 5 次谐波和 7 次谐波的电压畸变



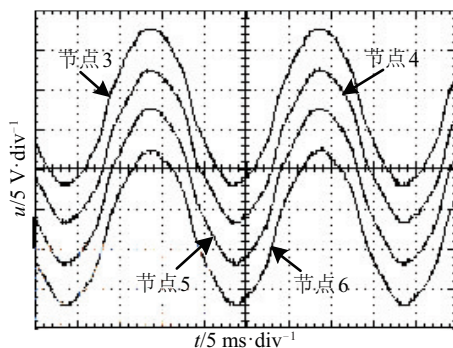
a. 不安装 RAPF



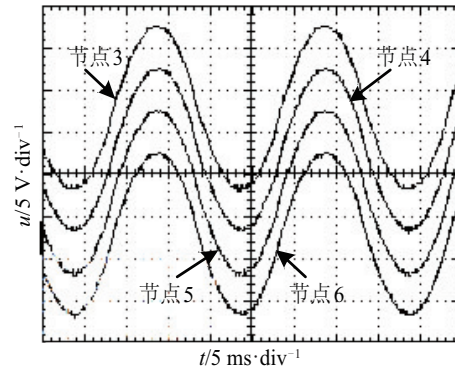
b. 安装 DFRAPF

图 16 节点 3 存在非线性负载时节点 3~节点 6 处的电压波形

Fig. 16 Voltage waveforms of bus 3, 4, 5, and 6 when the nonlinear load exists on bus 3



a. 不安装 RAPF

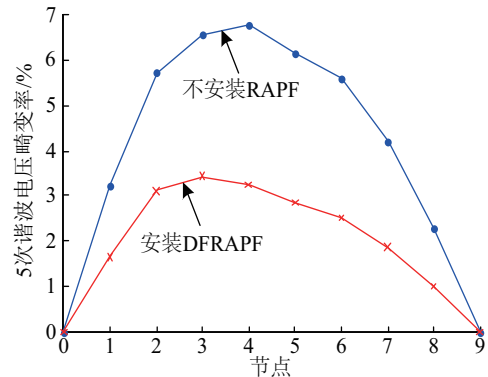


b. 安装 DFRAPF

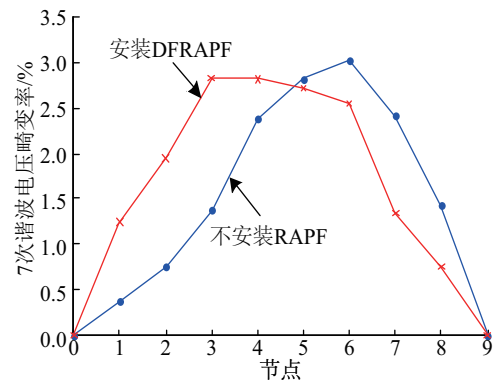
图 17 节点 7 存在非线性负载时节点 3~节点 6 处的电压波形

Fig. 17 Voltage waveforms of bus 3, 4, 5 and 6 when the nonlinear load exists on bus 7

率。图 18 和图 19 的实验结果分别与图 10 和图 12 仿真结果对应,验证了 DFRAPF 谐波抑制策略可有效抑制本级非线性负载注入的背景谐波的放大现象。



a. 5 次谐波



b. 7 次谐波

图 18 节点 3 存在非线性负载时谐波电压畸变率实验结果

Fig. 18 Experimental results of harmonic voltage-distortion rates when the nonlinear load exists on bus 3

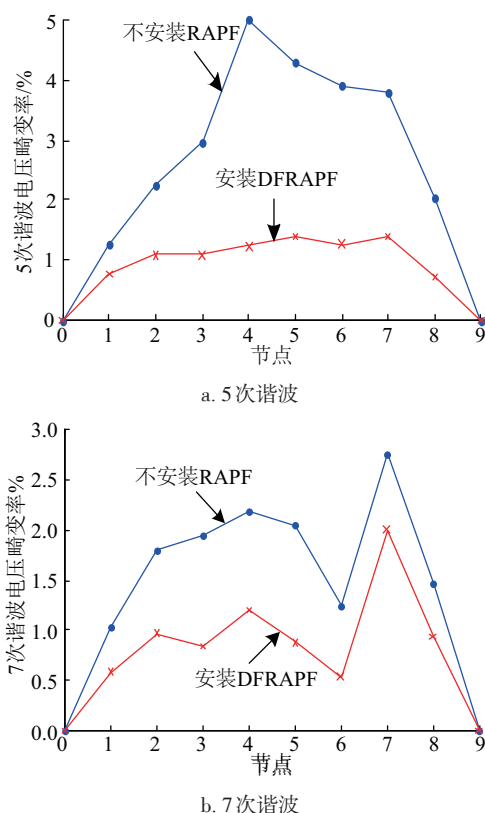


图19 节点7存在非线性负载时谐波电压畸变率实验结果
Fig. 19 Experimental results of harmonic voltage-distortion rates when the nonlinear load exists on bus 7

4 结 论

本文通过对基于末端微电网结构的配电网系统中配电线路上的背景谐波放大问题进行分析,得出线路上谐波的驻波规律:当配电线路长度为某次谐波1/2波长的正整数倍时,该次谐波被严重放大;当配电线路长度为某次谐波1/4波长的正奇数倍时,该次谐波不会被放大。本文提出DFRAPF谐波抑制策略,即在距离配电线路末端主要次谐波1/4波长的位置,针对相应次谐波安装与线路特征阻抗匹配的RAPF。该策略可有效抑制上级电网渗透和本级电网注入的背景谐波的放大现象,提高电能质量。

[参考文献]

- [1] Currence E J, Plizga J E, Nelson H N. Harmonic resonance at a medium-sized industrial plant[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(4): 682—690.
- [2] Wada K, Fujita H, Akagi H. Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(4): 1123—1130.
- [3] Sun Xiaofeng, Lee Zhichao, Gong Lu. A novel control strategy of active filter for suppressing background harmonic voltage magnification in power distribution system[A]. International Power Electronics and Motion Control Conference (ECCE Asia)[C], Harbin, China, 2012.
- [4] Jintakosonwitt P, Akagi H, Fujita H, et al. Implementation and performance of automatic gain adjustment in a shunt-active filter for harmonic damping throughout a power distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(3): 438—447.
- [5] Lee Tzung-Lin, Li Jian-Cheng, Cheng Po-Tai. Discrete frequency tuning active filter for power system harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1209—1217.
- [6] Sun Xiaofeng, Zeng Jian, Chen Zhe. Site selection strategy of single-frequency tuned R-APF for background harmonic voltage damping in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 135—143.
- [7] Jintakosonwitt P, Akagi H, Fujita H, et al. Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout a power distribution system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 556—564.
- [8] Cheng P T, Lee T L. Distributed active filter systems (DAFSs): A new approach to power system harmonics[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(5): 1301—1309.
- [9] Lee Tzung-Lin, Cheng Po-Tai, Akagi H, et al. A dynamic tuning method for distributed active filter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(2): 612—623.
- [10] Li Yunwei, Vilathgamuwa D M, Loh P C. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195—1204.
- [11] He Jinwei, Li Yun-Wei. Hybrid voltage and current control approach for DG-grid interfacing converters with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1797—1809.
- [12] Wang Xiongfei, Blaabjerg F, Wu Weimin. Modeling

- and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421—6432.
- [13] He Jinwei, Li Yun-Wei, Wang Ruiqi, et al. Analysis and mitigation of resonance propagation in grid-connected and islanding microgrids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(1): 70—81.
- [14] He Jinwei, Li Yun-Wei, Munir M S. A flexible harmonic control approach through voltage-controlled DG-grid interfacing converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 444—455.

STUDY ON HARMONIC SUPPRESSION IN POWER DISTRIBUTION SYSTEM BASED ON END MICROGRID STRUCTURE

Sun Xiaofeng, Cai Yao, Ma Qun, Li Xin, Shen Hong

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: When the microgrid system based on voltage-controlled method (VCM) is connected to the end of a power distribution feeder, the end of the feeder shows short-circuit characteristic at harmonic frequencies approximately. The background harmonic voltages might be amplified due to the harmonic resonance between power-factor correction capacitors and system inductors, which threatens the safety of system equipment. In order to solve the background harmonic amplification problem in this system, the discrete frequency resistive active power filter (DFRAPF) harmonic suppression strategy is proposed. In this strategy, the resistive active power filter (RAPF) operating as the characteristic impedance of the feeder is installed on the position which is a quarter of a specific harmonic wavelength from the end of the feeder for all dominant harmonics. The strategy could suppress the background harmonic amplification and reduce the voltage distortion effectively in the power distribution system based on end microgrid structure. Simulation and experimental results validate the effectiveness of the proposed strategy.

Keywords: microgrid; power distribution feeder; background harmonic amplification; DFRAPF; harmonic suppression