

I-APF在基于末端微电网结构的配电网中的应用

孙孝峰, 蔡 瑶, 韩瑞静, 翟燕飞, 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: 针对基于末端微电网结构的配电网中的背景谐波传播放大问题, 提出一种在配电网始端安装无限长有源电力滤波器(I-APF)的谐波抑制方案。对于配电网始端的由上级配电网渗透的背景谐波电压源, 该方案可实现末端在任意负载情况下的谐波传播抑制; 对于配电网末端的由微电网渗透的背景谐波电压源和非线性负载注入的背景谐波电流源, 该方案可有效抑制谐波传播放大引起的电压畸变。仿真与实验结果均验证了理论分析的正确性和所提方案的有效性。

关键词: 谐波; 微电网; 配电网; 有源电力滤波器

中图分类号: TM46

文献标识码: A

0 引 言

微电网的发展是解决能源危机和提高供电可靠性的重要途径之一, 已受到广泛关注^[1]。然而, 在微电网系统中, 非线性负载和分布式发电(distributed generation, DG)单元接口逆变器的控制死区等都会产生大量的低频次谐波, 引起公共耦合点(point of common coupling, PCC)处电压畸变^[2,3]。PCC处的谐波源不仅降低了微电网的供电质量, 而且对接入的配电网的安全、稳定运行造成危害^[4]。

基于末端微电网结构的配电网系统模型如图1所示, 本级配电网始端和末端分别为MV母线和PCC母线。MV母线上的背景谐波源为上级配电网渗透的谐波电压源, 而PCC母线上的背景谐波源为微电网渗透的谐波电压源和非线性负载注入的谐波电流源^[5]。由于配电网中功率因数校正电容与线路电感之间存在谐振, 背景谐波在线路上传播时可能被严重放大, 导致谐波污染加剧, 供电质量下降^[6]。

目前, 针对上级配电网渗透的背景谐波电压源和本级配电网中非线性负载注入的背景谐波电流源的传播放大问题, 已取得深入研究。文献[6]提

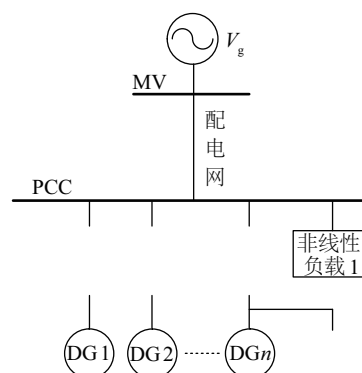


图1 基于末端微电网结构的配电网系统模型

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

出在线路末端安装阻抗匹配的阻性有源电力滤波器(resistive active power filter, R-APF)抑制谐波传播放大, 但当线路参数改变时, 其谐波抑制效果因阻抗不匹配而变差。文献[7]提出一种动态调节增益的有源滤波器, 可克服线路条件对谐波抑制效果的限制, 但存在“打鼹鼠”现象。而基于分频控制的有源滤波器, 可有效避免“打鼹鼠”^[8,9]。多R-APF系统也可有效抑制谐波传播放大, 但其成本较高^[10,11]。文献[12]提出一种混合有源电力滤波器, 可利用较低的成本实现较好的滤波性能。随

收稿日期: 2016-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51677162); 河北省自然科学基金(E2017203337; E2018203174); 光宝电力电子技术和科研基金(PRC20170956)

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、新能源变换与电网技术等方面的研究。sxf@ysu.edu.cn

着微电网的发展,可将 R-APF 功能嵌入 DG 接口逆变器,节约滤波成本,但其谐波抑制效果受限于 DG 单元的实际安装位置和功率容量^[13-15]。

就以上方案而言,均是在传统 R-APF 原理的基础上进行适当的改进。而文献[16]则提出一种安装在配电网末端的无限长有源电力滤波器(infinite active power filter, I-APF),不仅具有较好的谐波抑制效果,而且具有较强的鲁棒性;但是,该 I-APF 的实现是基于线路末端空载的条件,适应场合有限。本文针对基于末端微电网结构的配电网系统,提出一种在线路始端安装 I-APF 的谐波抑制方案。对于配电网始端的由上级配电网渗透的背景谐波电压源,该方案可实现末端在任意负载情况下的谐波传播抑制;对于配电网末端的由微电网渗透的背景谐波电压源和非线性负载注入的背景谐波电流源,该方案也可有效抑制谐波传播放大引起的电压畸变。仿真和实验结果均验证了所提方案的正确性和有效性。

1 背景谐波传播特性分析

1.1 配电网始端存在背景谐波源

在图 1 中,对于配电网始端 MV 母线上的电网等效电压源 V_g 而言,配电网末端非线性负载的等效阻抗、变压器的漏阻抗和 DG 单元的等效阻抗等所有阻尼的总和可等效为负载 Z_L 。假设配电网线路上的电阻 R 、电感 L 和电容 C 均匀分布,且线路空载、无支路,则图 1 系统中配电网的集总参数模型如图 2 所示,表 1 给出了配电网的线路参数。

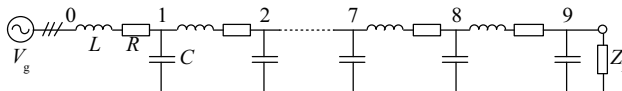


图2 配电网集总参数模型
Fig. 2 Lumped-parameter model of the feeder

图 3 为 MV 母线(节点 0)处存在由上级配电网渗透的背景谐波电压源 V_{gh} 时配电网的分布参数模型。其中, l 表示线路长度且 $l=9\text{ km}$, x 表示距节点 0 的距离, $V(x)$ 表示谐波谐振后形成的谐波电压驻波,其幅值表达式如式(1)所示。

表 1 线路参数

Table 1 Circuit parameters

参数	数值	参数	数值
基波频率 f/Hz	50	线路电容 $C/\text{mF}\cdot\text{km}^{-1}$	25
线路长度 l/km	9	线路电阻 $R/\text{W}\cdot\text{km}^{-1}$	0.36
线路分段数	9	特征阻抗 Z_c/Ω	8.9
线路电感 $L/\text{mH}\cdot\text{km}^{-1}$	1.98		

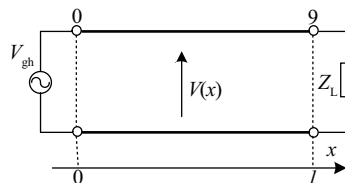


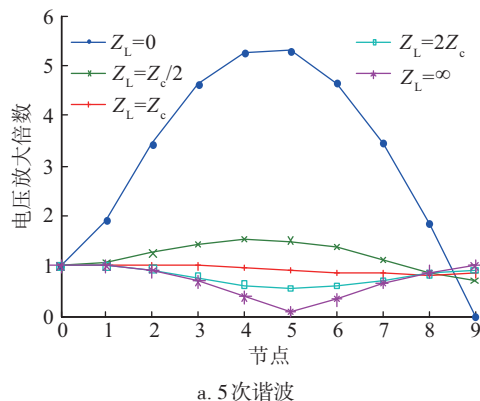
图3 V_{gh} 存在时配电网分布参数模型
Fig. 3 Distributed-parameter model of the feeder when V_{gh} exists

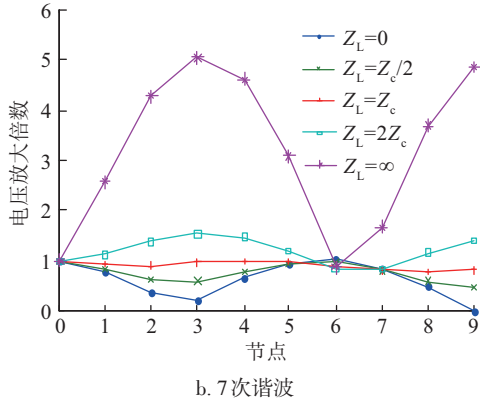
$$|V(x)| = \left| \frac{Z_L \cosh[\gamma(l-x)] + Z_c \sinh[\gamma(l-x)]}{Z_L \cosh(\gamma l) + Z_c \sinh(\gamma l)} V_{gh} \right| \quad (1)$$

式中, Z_c ——配电网的特征阻抗; γ ——配电网的传播系数。

由式(1)可知, V_{gh} 存在时的背景谐波传播特性与末端等效负载 Z_L 的阻抗值有关。且当 $Z_L=Z_c$ 时, $|V(x)|=|V_{gh}|$ 恒成立,不存在谐波传播放大现象,该结论即为传统 R-APF 实现谐波抑制的基本原理。

图 4 为当 V_{gh} 存在时,在不同的负载情况下各节点的谐波电压放大倍数仿真结果。其中, $Z_L=0$ 和 $Z_L=\infty$ 分别表示配电网末端短路和空载的情况。由图 4 可看出, Z_L 的阻抗值不同时,各次谐波的传播特性也不同。然而, Z_L 的阻抗值通常无法准确计算, DG 单元、负载的投切等都会改变 Z_L 的阻抗值。因此,对于基于末端微电网结构的配电网系统,传统的 R-APF 和文献[16]提出的基于空载条件



图4 始端谐波电压源 V_{gh} 存在时的谐波传播仿真结果Fig. 4 Simulation results of harmonic propagation when the harmonic-voltage source V_{gh} exists on the beginning

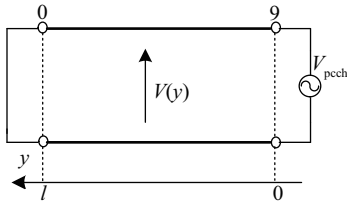
的末端 I-APF 并不适用,该系统需要一种对 Z_L 的阻抗变化不敏感的谐波抑制方案。

1.2 配电网末端存在背景谐波源

分析配电网末端 PCC 母线处存在背景谐波源时的谐波传播放大问题,不需要考虑末端等效负载 Z_L 的影响。因为末端背景谐波电压源在 Z_L 上的分压或背景谐波电流源在 Z_L 上的分流都是 Z_L 对背景谐波源的阻尼作用, Z_L 仅可衰减末端背景谐波源,但不会影响背景谐波在配电网中的传播特性。

1) 背景谐波电压源 V_{pech} 存在的情况

当 PCC 母线(节点 9)处存在由微电网渗透的背景谐波电压源 V_{pech} 时,由于配电网始端的电压源 V_g 对谐波表现为短路特性,故此时配电网的分布参数模型如图 5 所示。其中, y 表示距节点 9 的距离, $V(y)$ 表示谐波谐振后形成的谐波电压驻波。

图5 V_{pech} 存在时配电网分布参数模型Fig. 5 Distributed-parameter model of the feeder when V_{pech} exists

此时,谐波传播特性与图 3 中 $Z_L=0$ 的情况对称,且 $V(y)$ 的幅值表达式如式(2)所示。

$$|V(y)| = \left| \frac{\sinh[\gamma(l-y)]}{\sinh(\gamma l)} V_{pech} \right| \quad (2)$$

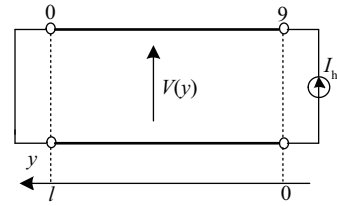
考虑无损线路,即 $\gamma = j\beta = j2\pi/\lambda$, 其中 β 表示相位系数, λ 表示谐波波长,式(2)可简化为:

$$|V(y)| = \left| \frac{\sin[2\pi(l-y)/\lambda]}{\sin(2\pi l/\lambda)} V_{pech} \right| \quad (3)$$

分析式(3)可知,当线路长度等于谐波半波长的整数倍时,式(3)分母为 0,对应次谐波被严重放大;当线路长度等于谐波 1/4 波长的正奇数倍时,式(3)结果不会超过 $|V_{pech}|$,对应次谐波不会被放大。

2) 背景谐波电流源 I_h 存在的情况

当 PCC 母线(节点 9)处存在由非线性负载引入的背景谐波电流源 I_h 时,配电网的分布参数模型如图 6 所示,其中 $V(y)$ 的幅值表达式如式(4)所示。

图6 I_h 存在时配电网分布参数模型Fig. 6 Distributed-parameter model of the feeder when I_h exists

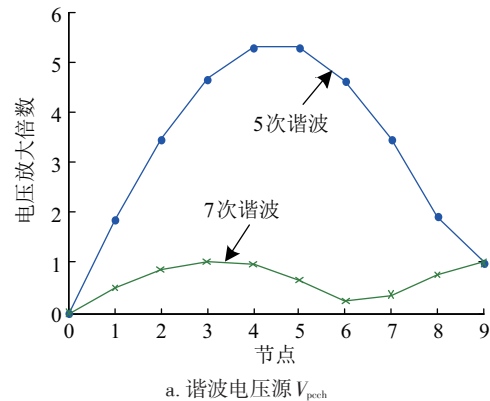
$$|V(y)| = \left| \frac{\sinh[\gamma(l-y)]}{\cosh(\gamma l)} Z_c I_h \right| \quad (4)$$

考虑无损线路,式(4)可简化为:

$$|V(y)| = \left| \frac{\sin[2\pi(l-y)/\lambda]}{\cos(2\pi l/\lambda)} Z_c I_h \right| \quad (5)$$

分析式(5)可知,当线路长度等于谐波 1/4 波长的正奇数时,式(5)分母为 0,对应次谐波电压含量很高,造成电压畸变严重;当线路长度等于谐波半波长的整数倍时,式(5)结果不会超过 $Z_c \cdot I_h$,对应次谐波电压含量维持在较低的水平,线路上电压畸变较小。

图 7a 和图 7b 分别为 V_{pech} 存在时各节点的谐波电压放大倍数仿真结果和 I_h 存在时各节点的谐波电压含量仿真结果。

a. 谐波电压源 V_{pech}

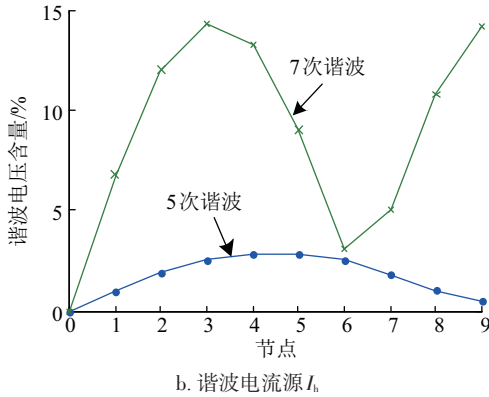


图7 末端谐波源存在时的谐波传播仿真结果
Fig. 7 Simulation results of harmonic propagation when the harmonic sources exist on the end

仿真中线路长度 $l=9$ km, 近似为 5 次谐波波长的 1/2 和 7 次谐波波长的 3/4。图 7a 中线路上 5 次谐波被严重放大, 7 次谐波不存在放大现象; 而图 7b 中各节点电压的 5 次谐波含量维持在 3% 以下, 但 7 次谐波含量最高已达 14.4%, 造成电压畸变严重。故图 7 的仿真结果与以上理论分析结果保持一致。

2 I-APF 谐波抑制方案分析

当配电网的线路长度趋于无限长时, 配电网中不存在谐波反射波, 谐波谐振得到有效抑制。基于此理论, I-APF 通过对谐波模拟无限长配电网实现谐波传播抑制^[16]。本文针对基于末端微电网结构的配电网系统, 提出一种在配电网始端安装 I-APF 的谐波抑制方案, 其实现原理如图 8 所示。

图 8a 为在节点 0(a) 与节点 b 之间对谐波模拟 x km 配电网后的系统等效模型, 谐波在该段模拟配电网中的传播特性如式(6)所示。

$$\begin{cases} u_{ah} = u_{bh} \cosh(\gamma x) + Z_c i_{bh} \sinh(\gamma x) \\ i_{ah} = i_{bh} \cosh(\gamma x) + \frac{u_{bh}}{Z_c} \sinh(\gamma x) \end{cases} \quad (6)$$

式中, u_{ah} 、 i_{ah} ——a 点的谐波电压和谐波电流; u_{bh} 、 i_{bh} ——b 点的谐波电压和谐波电流。

式(6)可通过如图 8b 所示的受控电流源和受控电压源的组合模型实现^[16]。由于 a 点为电压源 V_g , 对谐波表现为短路特性, 根据替代定理, 可单独采用受控电压源模拟 x km 配电网中谐波传播特性, 如图 8c 所示, 且其受控表达式为:

$$\begin{aligned} u &= u_{bh} [\cosh(\gamma x) - 1] + Z_c i_{bh} \sinh(\gamma x) \\ &= k_v u_{bh} + k_i i_{bh} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, k_v ——电压补偿系数; k_i ——电流补偿系数。

由于各次谐波的传播系数不同, 故当对各次谐波采用相同的补偿系数时, 虚拟的配电网长度 x 不同。但当补偿系数足够大, 即虚拟的配电网足够长时, 各次谐波的抑制效果相同, 且此时 k_i 与 k_v 的关系满足:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{k_i}{k_v} = \frac{Z_c \sinh(\gamma x)}{\cosh(\gamma x) - 1} = Z_c \quad (8)$$

因此, 当 k_i 与 k_v 的比值等于线路特征阻抗 Z_c 时, 可获得较理想的谐波抑制效果。

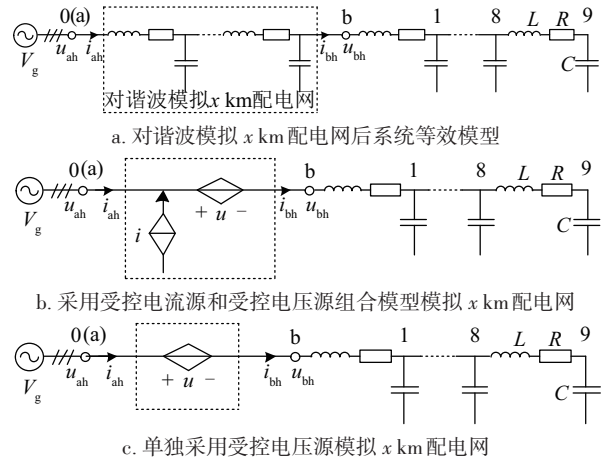
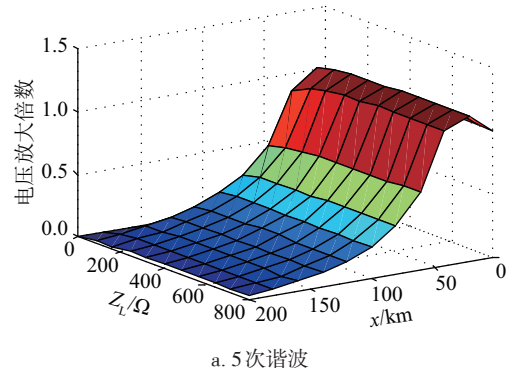


图8 I-APF对谐波模拟 x km 配电网的实现原理图
Fig. 8 Schematic diagram of I-APF to mimic x km feeder at harmonic frequencies

对于配电网两端不同的背景谐波源, 始端安装 I-APF 方案的谐波抑制效果不同, 具体如下:

1) 始端存在背景谐波电压源 V_{gh} 时, 始端安装 I-APF 的谐波抑制效果分析

图 9 为当节点 a 存在 5 次和 7 次谐波电压源时, 在不同的 Z_L 下, 5 次和 7 次谐波在经过 x km 模拟配电网后节点 b 处的谐波电压放大倍数。由图 9 可知, 无论末端等效负载 Z_L 的阻抗值为多少, 各次谐波在经过 150 km 模拟配电网后都会近似衰减为 0。故通过 I-APF 对谐波模拟线路长度 x 大于 150 km 的配电网即可取得很好的谐波抑制效果。



a. 5 次谐波

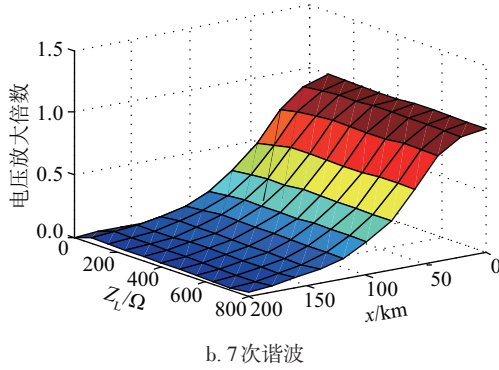


图9 模拟配电网长度 x 变化时节点b处谐波电压放大倍数

Fig. 9 Harmonic voltage-magnifying factors on bus b with the variation of the mimic feeder length x

根据式(7)和式(8),选取 $k_v=12, k_i=12Z_c$ 即可对各次谐波同时实现模拟无限长配电网($x>150$ km),并且在 I-APF 的安装节点之后,线路上各次谐波含量都近似为零。故将 I-APF 安装在配电网始端即可在整个配电网中实现谐波衰减,并且功率因数校正电容的投切和末端等效负载 Z_L 的变化均不会影响谐波衰减效果。

2)末端存在背景谐波电压源 V_{pcc} 和背景谐波电流源 I_h 时,始端安装 I-APF 的谐波抑制效果分析

由于配电网始端 V_g 对谐波表现为短路特性,故:

$$u_{ah} = u_{bh} \cosh(\gamma x) + Z_c i_{bh} \sinh(\gamma x) = 0 \quad (9)$$

则:

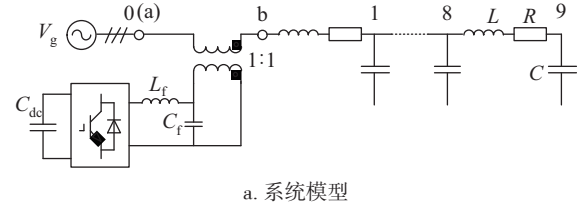
$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{u_{bh}}{-i_{bh}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{Z_c \sinh(\gamma x)}{\cosh(\gamma x)} = Z_c \quad (10)$$

因此配电网始端安装 I-APF 后,对于谐波源 V_{pcc} 和 I_h ,满足末端(节点 b)阻抗匹配原则,谐波传播得到有效抑制。并且,谐波抑制效果对配电网中功率因数校正电容的投切有较强的鲁棒性^[16]。

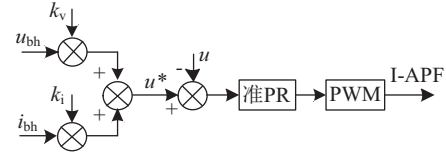
综上,在配电网始端安装 I-APF 的谐波抑制方案不仅对配电网两端的背景谐波源均具有较好的谐波抑制效果,而且对线路条件的改变具有较强的适应性。

3 仿真结果

为验证配电网始端安装 I-APF 的谐波抑制效果,根据图2和表1搭建9 km 配电网仿真模型,系统模型及 I-APF 控制框图如图10所示。其中, I-APF 的补偿系数选取 $k_v=12, k_i=12Z_c$ 。



a. 系统模型

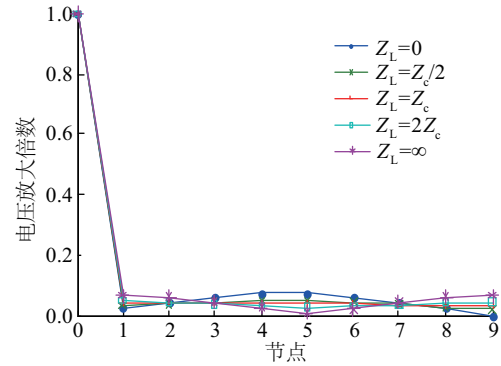


b. I-APF 控制框图

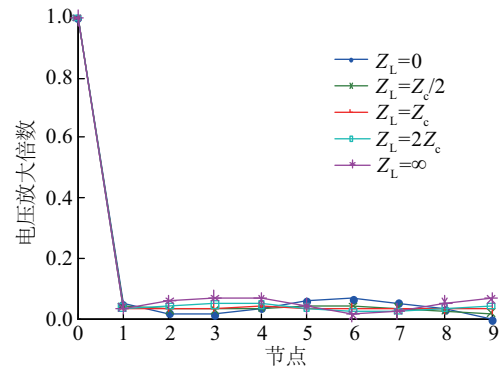
图10 节点0安装I-APF的系统仿真模型

Fig. 10 Simulation model of the system with I-APF installed on bus 0

图11表示当 V_g 中5次和7次谐波含量均为2%且在节点0处安装 I-APF 时,各节点在不同的 Z_L 下的谐波电压放大倍数仿真结果。



a. 5次谐波



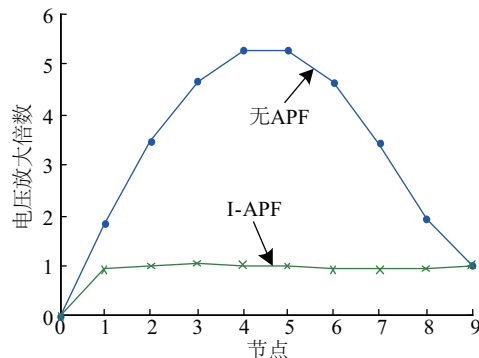
b. 7次谐波

图11 V_{gh} 存在时谐波电压放大倍数仿真结果

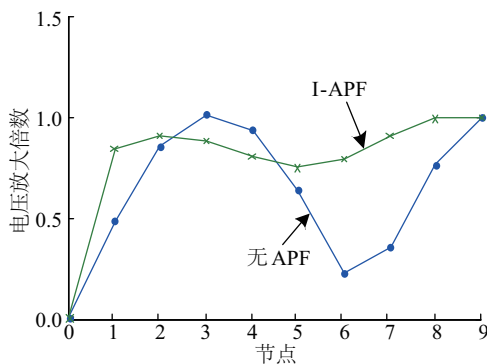
Fig. 11 Simulation results of harmonic voltage-magnifying factors when V_{gh} exists

由图11可知,对于配电网始端背景谐波电压源 V_{gh} ,在任意末端负载情况下,在节点0处安装 I-APF 都可将整个配电网中的谐波近似衰减为0。

图 12 为节点 9 处 PCC 电压 5 次和 7 次谐波含量均为 2% 时,在不安装 APF 和节点 0 处安装 I-APF 2 种情况下的谐波电压放大倍数仿真结果。由图 12 可看出,对于配电网末端的背景谐波电压源 V_{pcc} ,在节点 0 处安装 I-APF 可有效抑制谐波谐振,避免谐波传播放大现象的发生。



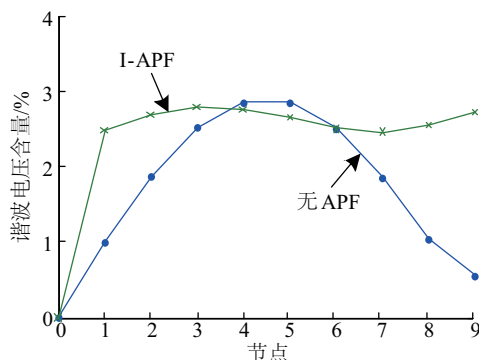
a. 5次谐波



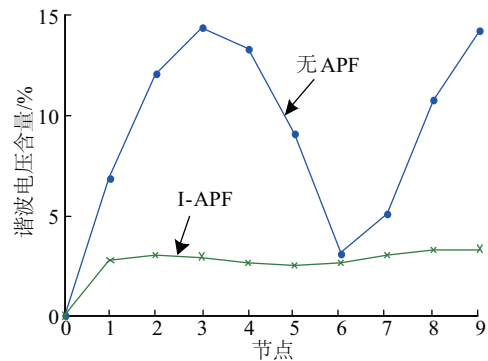
b. 7次谐波

图 12 V_{pcc} 存在时谐波电压放大倍数仿真结果Fig. 12 Simulation results of harmonic voltage-magnifying factors when V_{pcc} exists

图 13 为节点 9 处存在 5 次谐波电流源 $I_{h5}=1\text{ A}$ 和 7 次谐波电流源 $I_{h7}=1\text{ A}$ 时,在不安装 APF 和节点 0 处安装 I-APF 这 2 种情况下的谐波电压含量仿真结果。



a. 5次谐波



b. 7次谐波

图 13 I_h 存在时谐波电压含量仿真结果Fig. 13 Simulation results of harmonic voltage content when I_h exists

由图 13 可看出,对于配电网末端的背景谐波电流源 I_h ,在节点 0 处安装 I-APF 也可有效抑制谐波谐振,避免谐波传播放大。

4 实验验证

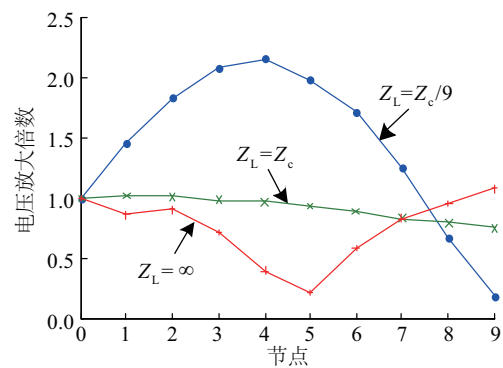
为验证所提新策略的有效性,根据表 1 和图 10 搭建了 9 km 配电网的单相模拟平台,实验中 I-APF 的相关参数如表 2 所示。

图 14 和图 15 分别为当 V_g 中 5 次和 7 次谐波含量均为 5% 时,不安装 APF 和节点 0 处安装 I-APF

表 2 I-APF 实验参数

Table 2 Experimental parameters of I-APF

参数	取值
直流侧储能电容 C_{dc}/mF	1
交流侧滤波电感 L_d/mH	0.44
交流侧滤波电容 $C_d/\mu\text{F}$	20
开关频率 f/kHz	10
电压补偿系数 k_v	12
电流补偿系数 k_i	$12Z_c$



a. 5次谐波

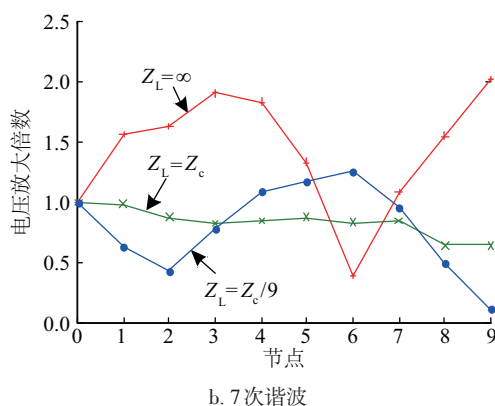


图 14 V_{ph} 存在且未安装 APF 时谐波电压放大倍数实验结果
Fig. 14 Experimental results of harmonic voltage-magnifying factors without APF when V_{ph} exists

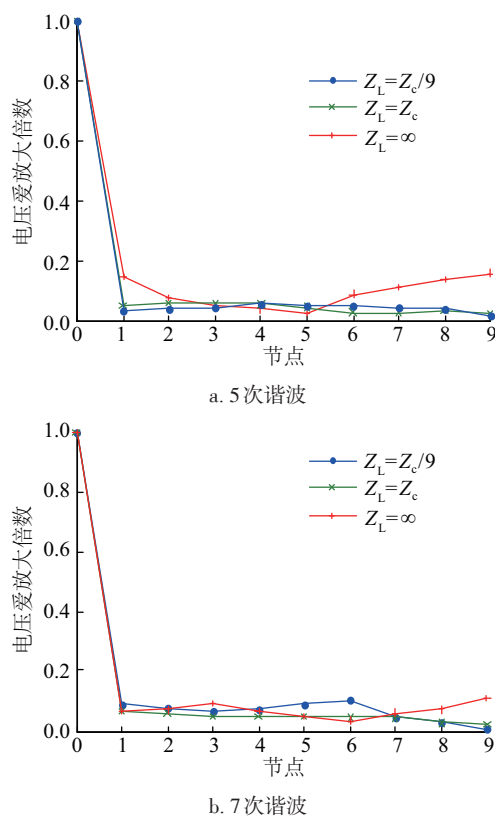


图 15 V_{ph} 存在且安装 APF 时谐波电压放大倍数实验结果
Fig. 15 Experimental results of harmonic voltage-magnifying factors with I-APF when V_{ph} exists

这 2 种情况下的谐波电压放大倍数实验结果。

由图 14 与图 15 的实验结果可知, Z_L 的阻抗值影响配电网始端背景谐波电压源 V_{ph} 存在时的谐波传播特性, 而始端安装 I-APF 在任意 Z_L 时均能取得较好的谐波抑制效果。

实验中配电网末端的背景谐波电压源 V_{pech} 采用

阻容负载不控整流桥实现, 其中电阻值为 1 W, 电容值为 14.1 mF。图 16 为 V_{pech} 存在时各节点的谐波电压放大倍数实验结果。

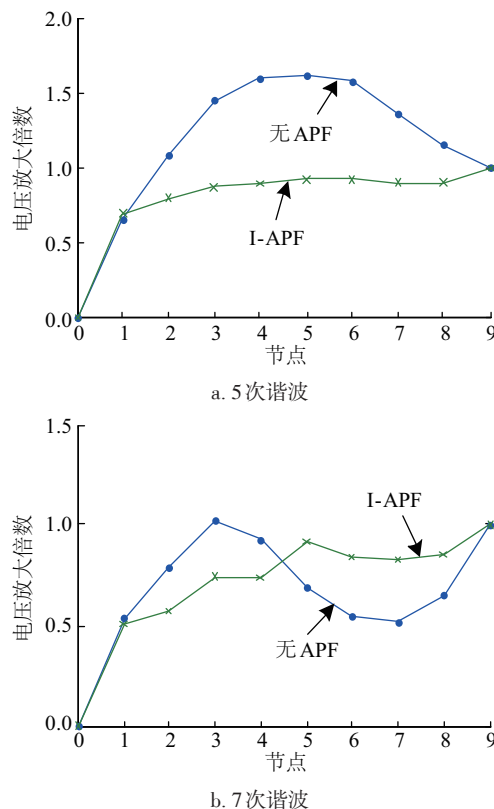
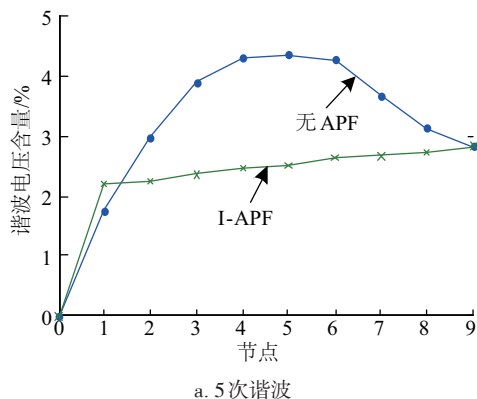


图 16 V_{pech} 存在时谐波放大倍数实验结果
Fig. 16 Experimental results of harmonic voltage-magnifying factors when V_{pech} exists

由图 16 可看出, 配电网始端安装 I-APF 可有效抑制末端背景谐波电压源存在时的谐波传播放大现象。

实验中配电网末端的背景谐波电流源 I_h 采用阻感负载不控整流桥实现, 其中电阻值为 12.9 Ω , 电感值为 0.92 H。图 17 为 I_h 存在时各节点的谐波电压含量实验结果。



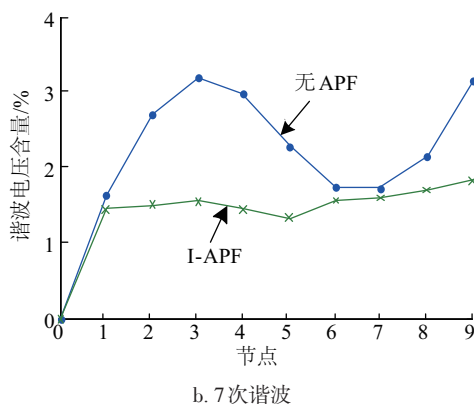


图 17 I_h 存在时谐波电压含量实验结果

Fig. 17 Experimental results of harmonic voltage content when I_h exists

由图 17 可看出,配电网始端安装 I-APF 可有效抑制末端背景谐波电流源存在时的谐波传播放大现象。

5 结 论

针对基于末端微电网结构的配电网系统,本文分别分析线路两端背景谐波源存在时的谐波传播特性,提出一种在配电网始端安装 I-APF 的谐波抑制方案,并得到以下结论:

1)对于始端由上级配电网渗透的背景谐波电压源,其传播特性与末端等效负载有关,在始端安装 I-APF 可实现末端在任意负载情况下的谐波有效衰减。

2)对于末端由微电网渗透的背景谐波电压源,当线路长度等于谐波波长的整数倍时,谐波放大现象严重;当线路长度等于谐波 1/4 波长的正奇数倍时,谐波不会被放大。在始端安装 I-APF 后,可实现阻抗匹配,有效抑制谐波传播放大,提高电能质量。

3)对于末端由非线性负载注入的背景谐波电流源,当线路长度等于谐波波长的整数倍时,电压畸变较小;当线路长度等于谐波 1/4 波长的正奇数倍时,电压畸变严重。在始端安装 I-APF 后,可实现阻抗匹配,有效抑制谐波传播放大,减小电压畸变。

[参考文献]

[1] Li Yunwei, Vilathgamuwa D M, Loh Poh-Chiang. Design, analysis, and real-time testing of a controller

for multibus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195—1204.

[2] Zhong Qing-Chang. Harmonic droop controller to reduce the voltage harmonics of inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 936—945.

[3] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9—16.

[3] Xie Ning, Luo An, Ma Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9—16.

[4] 孙树敏, 丁广乾, 程艳, 等. 多母线微电网稳态谐波电压间接分析方法[J]. 电测与仪表, 2013, 50(8): 31—35.

[4] Sun Shumin, Ding Guangqian, Cheng Yan, et al. Indirect steady state harmonic voltage analysis of multi-bus microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(8): 31—35.

[5] 李澍森, 陈晓燕. 500 kV 和 220 kV 系统电压谐波水平之间的关系探讨[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 49—52.

[5] Li Shusen, Chen Xiaoyan. Relationship between harmonics voltage levels of 500 kV and 220 kV network[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 49—52.

[6] 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.

[7] Jintakosonwit 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.
- [11] 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.
- [12] Lee Tzeng-Lin, Wang Yen-Ching, Li Jian-Cheng, et al. Hybrid active filter with variable conductance for harmonic resonance suppression in industrial power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 746—756.
- [13] 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.
- [14] He Jinwei, Li Yun-Wei, Blaabjerg F, et al. Active harmonic filtering using current-controlled, grid-connected DG units with closed-loop power control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 642—653.
- [15] 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.
- [16] Sun Xiaofeng, Lee Zhichao, Lu Gong, et al. 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.

STUDY ON APPLICATION OF INFINITE ACTIVE POWER FILTER IN POWER DISTRIBUTION FEEDER BASED ON END MICROGRID STRUCTURE

Sun Xiaofeng, Cai Yao, Han Ruijing, Zhai Yanfei, Li Xin, Shen Hong

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

Abstract: Aiming at the propagation amplification of the background harmonics in a power distribution feeder based on end microgrid structure, this paper proposes a harmonic suppression strategy that an infinite active power filter (I-APF) is installed on the beginning of the feeder. For the background harmonic-voltage sources on the beginning of the feeder which come from the penetration of the higher level system, the strategy could suppress the harmonic propagation amplification with regard to an arbitrary load. For the background harmonic-voltage sources caused by the penetration of microgrid and the background harmonic-current sources injected by the nonlinear loads on the end of the feeder, the strategy is also able to reduce the voltage distortion resulted from the harmonic propagation amplification. Simulation and experimental results validate the effectiveness of the proposed strategy.

Keywords: harmonic; microgrid; power distribution feeder; active power filter