

DOI: 10.7667/PSPC150755

采用三相不可控整流充电机的电动汽车充电站 谐波放大效应分析与计算

刘敏¹, 周晓霞¹, 陈慧春¹, 谢维兵¹, 敬勇¹, 王佳佳², 魏能峤², 周念成²

(1. 国网重庆市电力公司技能培训中心, 重庆 400044;
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 电动汽车充电站并联有源滤波器工作时, 可能引起流过充电站集电母线的充电电流谐波出现放大效应。针对谐波污染最严重的三相不可控整流充电机, 研究充电站各次谐波电流与谐波电压的耦合关系, 定义电动汽车充电站总谐波电流放大系数, 提出一种充电站集电母线电流谐波放大程度的量化方法。该方法实现了电流谐波放大效应的解析计算且具有较高精度。在此基础上, 探讨谐波放大系数随充电机台数、有源滤波补偿率及相位差等因素的变化规律, 为有源滤波器容量配置与控制设计提供依据。

关键词: 电动汽车; 三相不可控整流; 有源电力滤波器; 谐波放大; 集电母线

Analysis and calculation on harmonic amplification effect of electric vehicle charging station using three-phase uncontrolled rectification charger

LIU Min¹, ZHOU Xiaoxia¹, CHEN Huichun¹, XIE Weibing¹, JING Yong¹, WANG Jiajia²,
WEI Nengqiao², ZHOU Niancheng²

(1. Power Supply Bureau Skills Training Center of Chongqing, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China)

Abstract: In electric vehicle (EV) charging stations equipped with shunt active power filters (APFs), the operation of the shunt APF may amplify (harmonic amplification) the charging current harmonics at the point of power collection. This paper focuses on an EV charging station with three-phase uncontrolled rectification chargers that produces the most serious harmonic pollution. By analyzing the coupling relationship between harmonic current and voltage of EV charging stations, as well as by defining the total harmonic current amplification factor, this paper proposes an analytical method to quantify the amplification degree of charging current at the point of power collection. On this basis, the variation trends show how the amplification factor changes with key parameters, such as quantity of chargers, compensation rate, and compensation phase difference of APFs are discussed. The results are beneficial to gaining further understanding on capacity correction and control design of APFs in an EV charging station.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577018).

Key words: electric vehicle; three-phase uncontrolled rectifier; active power filter; harmonic amplification; point of power collection

0 引言

随着电动汽车的推广与应用, 大量非线性充电设施接入电网将带来不容忽视的谐波污染, 特别是

早前投运充电站中广泛使用的不可控和相控整流充电机^[1-4]。电动汽车充电机的电流谐波经电网传递后将导致电网电压畸变, 影响变压器使用寿命, 增加电网损耗和电压波动^[5-8]。采用在充电机自身增加有源功率因数校正^[9]和模块化变流器^[10]、在充电站整体配置有源滤波器^[11](Active Power Filter, APF)等方

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577018)

式治理充电站谐波。对已投运的无源功率因数校正整流充电站,很难从充电机自身减小谐波^[12-13],此时充电站须配置 APF。相对于串联型 APF,并联 APF 以其安装方便、技术成熟等优势得到最为广泛的应用^[11,14-15]。然而对接入多台充电机的电动汽车充电站,并联 APF 工作后充电站谐波电流可能会出现放大现象,忽略该效应会导致谐波电流不能被完全补偿或有源滤波器过载。因此,需要深入研究充电站谐波放大效应影响因素及其量化计算方法。

电网电压经充电机前级整流电路后,在负载侧生成直流电流,该电流经整流器与交流电网耦合,导致充电站电流出现谐波畸变。充电站谐波电流与电网阻抗相互作用,使充电站集电母线电压产生谐波分量,将引起充电机谐波电流出现衰减^[16-18]。而当采用并联有源滤波器进行补偿时,充电机(非线性负载)的谐波电流可能会出现放大^[19-20]。目前,已有相关文献对衰减现象进行研究,指出非线性负载的谐波衰减与端电压状况有关^[16]。但针对放大效应的研究相对较少,尤其是充电站 APF 引起的谐波放大。文献[19]在谐波衰减系数的基础上,定义并联有源滤波引起不可控整流负荷的谐波放大系数,利用时域仿真分析其谐波放大特性,但未能给出放大效应的解析计算方法。文献[20]采用戴维南电路对谐波负载进行等值,推导不同补偿率下谐波放大系数解析式,但由于未考虑各次谐波间的耦合,不能真实反映负载的谐波放大效应。尚未有一种量化方法对充电站并联 APF 的谐波放大程度进行解析。

电动汽车充电可用单相或三相整流充电机,其中三相充电机应用最为普遍^[21]。本文针对采用三相不可控整流充电机的电动汽车充电站,研究并联 APF 引起的充电电流谐波放大效应,探讨充电站各次谐波电流与电压的耦合关系;定义谐波电流放大系数,提出一种量化方法以解析计算充电站谐波的放大系数;进而研究充电机台数、有源滤波补偿率、补偿相位差等因素对谐波放大效应的影响。

1 电动汽车充电站谐波放大效应

在已投运的电动汽车充电站中三相不可控整流充电机主要使用无源功率因数校正,以改善电流波形和提高功率因数^[3-4],如重庆空港、中山乐群充电站^[22]。三相电压经整流桥作用,由直流侧滤波电感 L 和滤波电容 C 组成的无源功率因数校正后,作为直流变换电路的输入为蓄电池充电(图 1),采用变化的负载等效电阻对不同阶段的高频功率变换电路进行等值^[3-4]。对于该电路的各相充电电流而言,半周波内存在两次充电过程,随着直流侧充电功率变化,

半周波的两次导通过程中充电电流会出现断续和连续的情况。图 2(a)显示了含多台三相不可控整流充电机的电动汽车充电站接线,并联 APF 通过注入反向电流,以抑制充电站公共连接点注入电网的电流谐波,但可能会使流过集电母线的充电电流谐波(不含 APF 补偿电流)出现放大效应。

为说明充电站谐波放大效应的存在,搭建图 2(b)所示的电磁暂态仿真模型,设充电站中 N 台额定功率为 70 kW 的充电机经公共母线接入短路容量为 6 MVA 和 $X/R=5$ 的 380 V 电网,各台充电机参数相同,滤波电感 $L=0.5$ mH 和 $R_f=0.014$ Ω 、电容 $C=2215$ μF ^[3],充电功率为 9 kW 和 65 kW(分别对应充电电流断续和连续)时充电站谐波电流仿真结果,如图 3 所示。

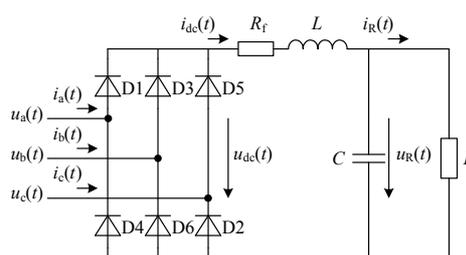
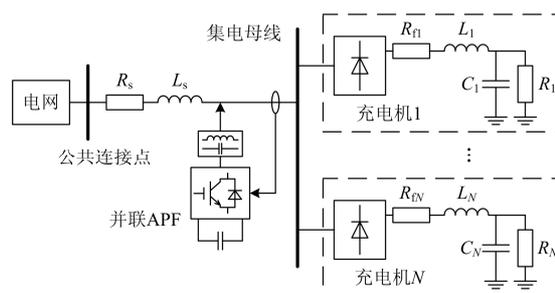
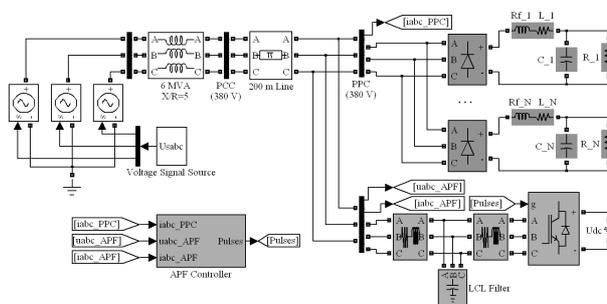


图 1 三相不可控整流充电机等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of electric vehicle charger with three-phase uncontrolled rectifier



(a) 接线图



(b) 仿真模型

图 2 电动汽车充电站接线与仿真模型

Fig. 2 Single line diagram and simulation model of charging station

图 3(a)中并联 APF 停运时,随着充电机从 1 台增加至 5 台,流过集电母线的充电电流各次谐波含有率和总谐波畸变率显著减小,这是由充电站谐波电流在电网阻抗上的谐波压降增大导致的^[16,21]。图 3(b)为充电站接入 5 台充电机时集电母线汇集的总谐波电流,对比 APF 接入前后各次电流谐波,APF 工作后将使充电站集电母线汇集的电流谐波上升,充电功率越大谐波电流放大效应越明显。这是由于 APF 工作后,减小了充电站接入点的电压谐波,抑制了充电机谐波电流的衰减^[16-17, 23],进而使各台充电机输出电流的谐波增加,即出现放大效应。

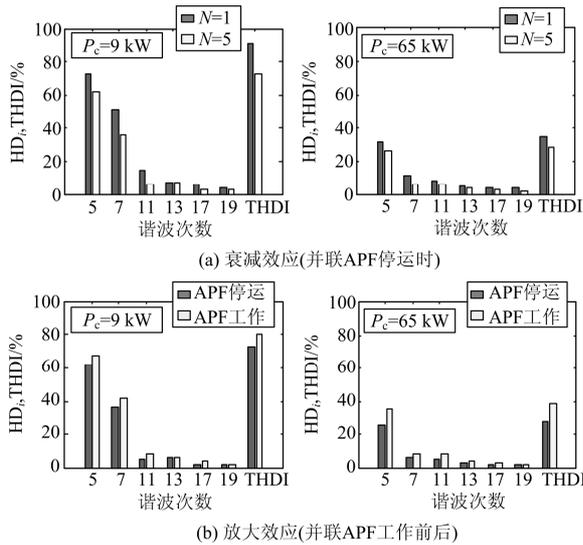


图3 并联APF引起的充电站电流谐波放大效应

Fig. 3 Amplification effects of harmonic current in charging station caused by shunt APF

对某充换电站两个相邻工作日(电动客车的充电频次基本一致)的谐波电流进行测试,其中第 1 天 APF 停运、第 2 天 APF 工作,该充电站 a 相电流的 5 次和 7 次谐波(平均值)的相量散点图如图 4 所示。对比图 4(a)和图 4(b),APF 停运的一天内 5 次、7 次谐波电流有效值最大分别为 81.4 A 和 20.3 A,而 APF 工作后它们分别增加至 109.7 A 和 30.1 A,即 APF 投运后流过充电站集电母线的充电机谐波电流明显增加。

2 充电站谐波放大效应量化计算

利用仿真分析可研究电动汽车充电站谐波电流放大效应,但无法对其进行解析计算。为此,文献^[23-24]探讨充电站各次谐波电流与谐波电压的耦合关系,建立单相和三相整流电路的谐波耦合导纳矩阵模型,通过将时域非线性转换成频域线性矩阵形

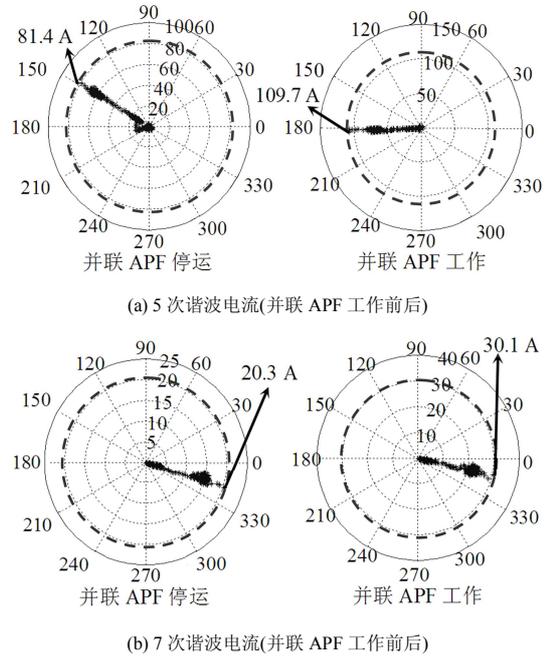


图4 并联APF工作前后充电电流谐波

Fig. 4 Charging current harmonic with and without shunt APF

式,实现整流装置交流电流的解析计算。在此基础上,结合文献^[19]定义的第 k 次电流谐波放大系数 IF_k ,可量化有源滤波引起的电流谐波放大效应。

$$IF_k = \frac{I'_k}{I_k} = \frac{|y_k^+ U_h' + y_k^- U_h'^*|}{|y_k^+ U_h + y_k^- U_h^*|} \quad (1)$$

式中: I_k 和 I'_k 为 APF 接入前后流过充电站集电母线的第 k 次谐波电流幅值; U_h 、 U_h^* 和 U_h' 、 $U_h'^*$ 是 APF 接入前后集电母线的电压谐波向量及其共轭向量; y_k^+ 、 y_k^- 为谐波耦合导纳矩阵 Y^+ 和 Y^- 中第 k 次电流谐波对应行向量。若考虑电网本身的背景谐波,须按给定条件设定 APF 接入前的电压 U_h 和 U_h^* 。

图 5 显示了电动汽车充电站谐波放大系数的计算过程,认为滤波前后谐波导纳矩阵元素近似不变。根据充电机频域解析模型以及网络方程可迭代计算^[19]充电站 APF 投入前后流过集电母线的充电机谐波电流,其中 APF 按所有充电机的谐波电流与自身补偿率乘积,注入等比例的反向补偿电流。利用式(1)进而确定充电站谐波放大系数。该方法通过解析的方式获取充电机不同运行模式下的放大系数,以量化分析充电站 APF 过载程度。

电动汽车充电机在充电过程中通常运行于重载,即充电电流连续情况以保证较高充电效率,以图 3(b)算例中单机充电功率 65 kW 为例,5 次谐波导纳矩阵行向量 $Y_{5,1}^+ = 0.201 + j0.156 \text{ S}$ 、 $Y_{5,5}^+ = 3.44 + j3.875 \text{ S}$ 、 $Y_{5,1}^- = 0$ 、 $Y_{5,5}^- = -0.529 + j0.526 \text{ S}$,APF 停

运时 $U_1=215\angle 126.04^\circ \text{ V}$ 、 $U_5=3.21\angle -74.01^\circ \text{ V}$ (仅考虑基波和 5 次谐波电压); 设滤波后电压只含基波分量, 此时可得 5 次谐波电流放大系数 $IF_5=54.7 \text{ A}/40.23 \text{ A}=1.36$ 。充电站各次电流谐波放大系数随功率变化的计算和仿真结果如图 6 所示, 可见利用谐波解析模型可准确计算谐波放大系数。

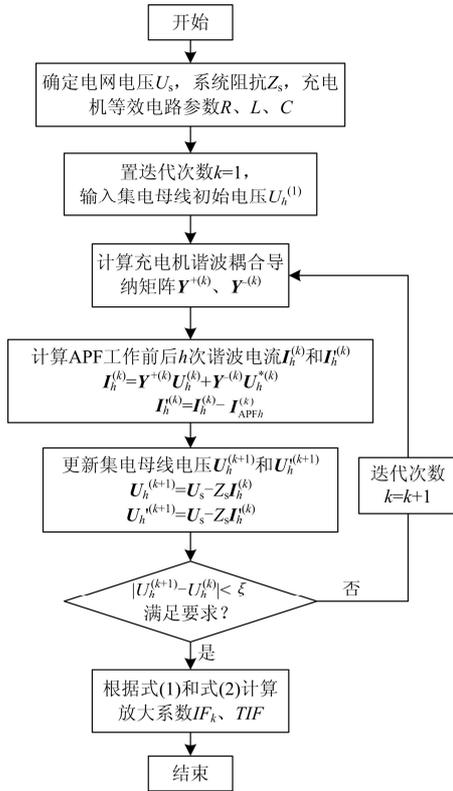


图 5 放大系数 IF_k 和 TIF 的计算流程

Fig. 5 Calculation flow of IF_k and TIF

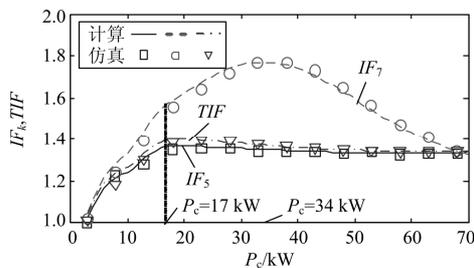


图 6 电流谐波放大系数随充电功率变化

Fig. 6 Amplification coefficients of harmonic current versus charging power

当 $IF_k > 1$ 时并联有源滤波器将导致充电站出现谐波放大, $IF_k < 1$ 时对应于谐波衰减区域。充电机谐波电流以 5、7 次为主, 图中 IF_5 和 IF_7 在充电功率小于 5 kW 时接近于 1, 但仍未出现谐波衰减。为评估并联 APF 引起的充电电流谐波放大效应, 本文将式(1)的各次谐波放大系数扩展至总电流谐波, 即各

次谐波放大系数的加权均方根值。

$$TIF = \sqrt{\sum_{k=5}^K I_k^2} / \sqrt{\sum_{k=5}^K I_k^2} = \sqrt{\sum_{k=5}^K (I_k IF_k) / \sqrt{\sum_{k=5}^K I_k^2}} = \sqrt{\sum_{k=5}^K (\omega_k IF_k)^2} \quad (2)$$

式中, ω_k 为第 k 次电流谐波的权系数。图 6 中还显示总电流谐波放大系数, 在功率小于 17 kW 时各次谐波放大系数随功率增加呈上升趋势, 它们的加权均方根 TIF 也逐渐增加。随功率增加第 5 次谐波的权系数越来越大, 使得 TIF 逐渐逼近于 IF_5 。

APF 实时测量充电站注入电网的电流谐波并进行谐波补偿, 补偿率越高将使充电电流谐波越大, 导致充电站谐波电流不能被完全补偿, 部分情况下谐波放大效应还可能使 APF 过载。由式(2)可知, 总电流谐波放大系数 TIF 为 APF 工作与停运时的总谐波电流有效值之比, 利用该系数即可衡量有源滤波过载程度, 进而准确配置并联 APF 容量。

3 充电站谐波放大效应影响因素及变化规律

3.1 与短路容量和充电机台数关系

以充电站接入 5 台充电机为例, 电网短路容量 S_s 变化时(其余参数同图 3 算例), 流过充电站集电母线的充电电流各次谐波和总谐波放大系数的变化如图 7 所示。在电流断续($P_c=9 \text{ kW}$)和连续($P_c=65 \text{ kW}$)两种情况下, 不同短路容量对应的充电站电流谐波放大系数均大于 1。图 7(a)中 IF_5 和 IF_7 随短路容量减小逐渐增大, 且 TIF 趋势与 IF_5 和 IF_7 一致。

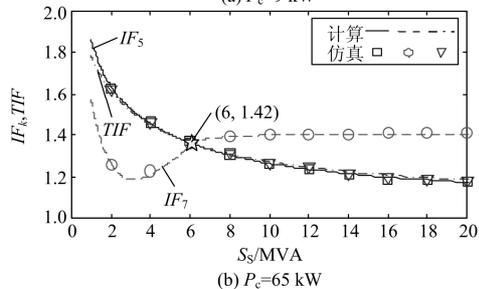
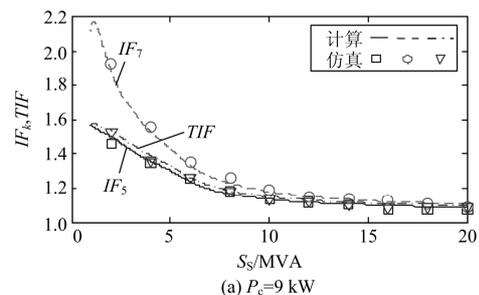


图 7 电流谐波放大系数随电网短路容量变化

Fig. 7 Amplification coefficients of harmonic current versus short circuit capacity

图 7(b)连续充电时 IF_7 与 IF_5 系数的变化趋势差别较大, IF_7 随短路容量增加先减小, 在 $S_s=3\text{MVA}$ 之后又逐渐上升至稳定值不变; 由于 7 次电流谐波含量小, 使得 TIF 变化趋势与 IF_5 一致。图中还给出 $S_s=6\text{MVA}$ 和单机充电功率为 65 kW 时, 充电站谐波放大系数的仿真结果, 其中 IF_5 为 1.42 与第 2 节 5 次谐波放大系数计算值 1.36 相吻合。为衡量电动汽车充电站谐波放大系数仿真值与采用本文方法计算值随电网短路阻抗变化的接近程度, 表 1 列出 IF_5 、 IF_7 和 TIF 的相对误差, 以仿真值为真值。不同运行模式下充电站放大系数的误差均低于 10%, 由此验证本文方法的正确性。

表 1 谐波放大系数随短路阻抗变化的误差分析

Table 1 Error analysis of the amplification factor changing with short-circuit capacity

运行模式	放大系数误差	短路阻抗/MVA								
		2	4	6	8	10	12	16	18	20
$P_c=9\text{ kW}$	$IF_5/\%$	8.7	7.5	7.1	6.7	5.8	4.9	3.5	3.2	2.5
	$IF_7/\%$	9.1	8.5	7.8	7.5	6.2	4.8	4.2	4.3	2.9
	$TIF/\%$	7.2	6.9	6.9	6.2	5.5	4.8	3.3	3.5	2.1
$P_c=65\text{ kW}$	$IF_5/\%$	7.9	7.2	4.6	5.2	5.0	4.3	4.1	3.2	1.5
	$IF_7/\%$	8.3	7.8	7.4	6.0	6.2	4.9	5.2	3.7	2.6
	$TIF/\%$	7.8	7.1	6.5	5.2	5.5	4.4	4.5	2.9	1.8

图 8 为电网短路容量 6 MVA 时不同充电功率下充电站电流谐波放大系数随充电机接入台数的变化特性。当充电机台数增加时, 电流谐波放大系数的变化趋势与电网短路容量减小时相似。在充电功率 $P_c=65\text{ kW}$ 的图 8(b)中 IF_5 随充电机台数增加而上升, 但 IF_7 则与 IF_5 的变化趋势有明显差异(与图 7(b)类似)。对于总电流谐波放大系数 TIF , 当充电机台数增加至 13 台后, 放大系数的上升幅度逐渐平缓且不超过 1.6。图中 TIF 与 IF_5 基本接近, 为简化计算, 可直接利用 IF_5 系数修正并联 APF 的配置容量。表 2 显示充电站谐波放大系数 IF_5 、 IF_7 和 TIF 计算值和仿真值随充电机台数变化的相对误差(以仿真值为真值), 充电功率大的放大系数误差相对较小, 但均保持在可接受范围内。

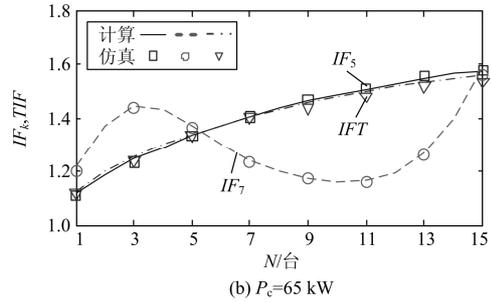
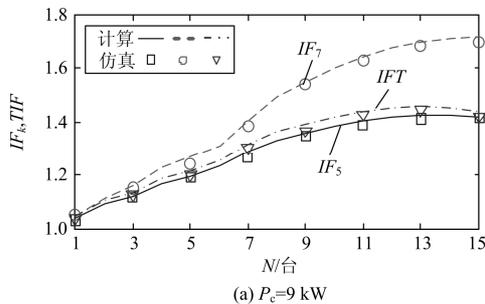


图 8 电流谐波放大系数随充电机台数变化

Fig. 8 Amplification coefficients of harmonic current versus the number of charger

表 2 电流谐波放大系数随充电机台数变化的误差分析

Table 2 Error analysis of the amplification factor changing with the quantity of the charger

运行模式	放大系数误差	充电机台数							
		1	3	5	7	9	11	13	15
$P_c=9\text{ kW}$	$IF_5/\%$	3.3	4.1	5.7	7.4	8.2	7.8	8.4	9.3
	$IF_7/\%$	3.6	5.2	6.6	7.9	8.5	7.6	8.0	9.6
	$TIF/\%$	3.0	4.3	5.8	7.5	8.0	7.4	8.3	9.2
$P_c=65\text{ kW}$	$IF_5/\%$	2.5	3.3	4.2	4.8	6.2	5.5	7.2	8.4
	$IF_7/\%$	3.1	3.9	5.1	5.9	6.8	6.4	7.8	9.1
	$TIF/\%$	2.7	3.4	4.5	5.1	6.3	5.9	7.0	8.3

3.2 与补偿率和补偿相位差关系

充电站流过集电母线的充电电流谐波分量 i_{ah} 和补偿电流 i_{ahc} 如图 9 所示, 其中下标 ah 和 ahc 分别表示 A 相电流的谐波分量及其补偿电流, I_{ah} 、 I_{ahc} 为 i_{ah} 和 i_{ahc} 的最大值, t_{ah} 、 t_{ahc} 为最大值所对应的的时间。并联 APF 通过注入 $-i_{ahc}$ 以抑制充电站公共连接点的谐波电流。通常并联 APF 不能完全补偿谐波电流, 采用补偿率 I_{ahc}/I_{ah} 和补偿相位差 $2\pi(t_{ahc}-t_{ah})/T$ 描述 APF 的补偿效果。图 10 为 IF_5 、 IF_7 和 TIF 随补偿率和补偿相位差变化的计算值, 其电网短路容量为 6 MVA, 充电站包含 5 台充电功率为 65 kW 的充电机。

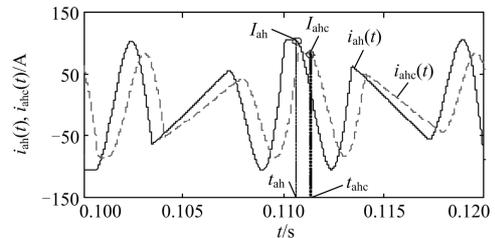


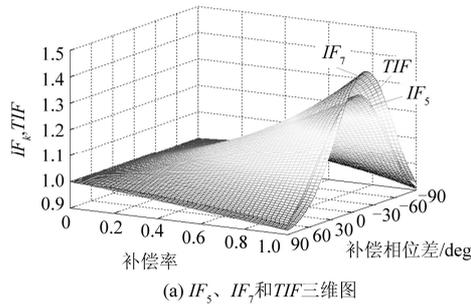
图 9 充电站充电电流谐波分量和补偿电流

Fig. 9 Harmonic component of charging current and compensation current in charging station

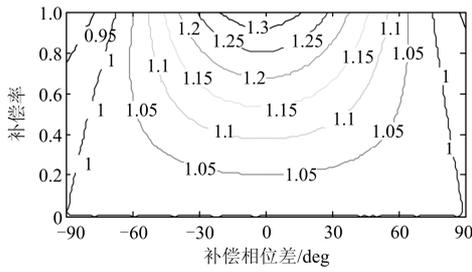
与前述情况类似, 不同补偿率和相位差下图 10(a)的 TIF 与 IF_5 三维曲面相差很小。并联 APF 停

运(补偿率为 0)时,放大系数 IF_5 、 IF_7 和 TIF 等于 1, 充电站未出现充电电流谐波放大效应。随着补偿率的增加和补偿相位差的减小, 各谐波放大系数均逐渐增加, 且 IF_7 的增幅略大于 IF_5 和 TIF 。

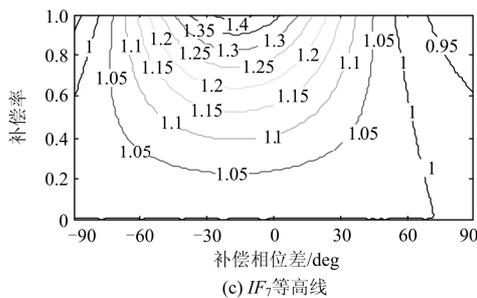
图 10(b)和图 10(c)显示了 IF_5 和 IF_7 的等高线, 其中放大系数为 1 的等高线内侧和外侧分别对应于谐波放大和衰减补偿区域。图中 IF_5 在补偿相位差为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 范围内呈现放大效应, 而 IF_7 放大效应的相位差区间约为 $[-\pi/2, \pi/3]$ 。可知, 充电站谐波放大效应出现依赖于并联 APF 的补偿相位差, 据此可指导 APF 控制设计; 而补偿率则决定放大系数的幅值, 该结果为给定补偿率下并联 APF 选型提供依据。



(a) IF_5 、 IF_7 和 TIF 三维图



(b) IF_5 等高线



(c) IF_7 等高线

图 10 电流谐波放大系数随补偿率及其相位差变化

Fig. 10 Amplification coefficients of harmonic current versus the compensation rate and its phase difference

3.3 与电网背景谐波和变压器传递关系

当电网含有背景谐波时, IF_5 和 TIF 在不同谐波条件下随充电功率的变化如图 11 所示, 其中谐波轻微、严重两种情况对应于文献[25]表 1 中案例 1、2

的两种电压谐波条件。由图可知, 电网背景谐波增加后, 充电站谐波放大系数将明显下降, 甚至在充电功率小于 10 kW 时 IF_5 和 TIF 小于 1, 出现了小范围的充电电流谐波衰减。图 11 中电网谐波轻微、严重情况的 IF_5 和 TIF 系数最大相对误差分别为 5.2%、9.7%, 可见电网背景谐波增加后本文方法的计算误差将随之增加但仍小于 10%, 该方法对谐波条件变化具有一定的适应性。

为分析变压器接线方式对充电电流谐波放大效应的影响, 计算充电功率 $P_c=9$ kW 和 65 kW 两种情况下的 IF_5 和 TIF , 如图 12 所示, 其中变压器额定容量为 2 MVA, $U_1/U_{11}=10/0.38$ kV, $X_1=0.06$ p.u., $R_1=0.03$ p.u。图 12 中还给出了不同接线方式下变压器二次侧对一次侧电压总谐波畸变率的比值 η_{THD} , 采用 Y/ Δ 和 Δ /Y 两种接线方式时变压器二次侧的电压谐波显著降低, 而 $P_c=9$ kW 和 65 kW 的 IF_5 和 TIF 均有不同程度的上升。这是由于电压经变压器传递后谐波畸变程度衰减, 使得充电电流的谐波放大增强。采用 Y/Y 接线方式时变压器两侧谐波变化不大, 此时变压器对谐波放大效应的影响最小。

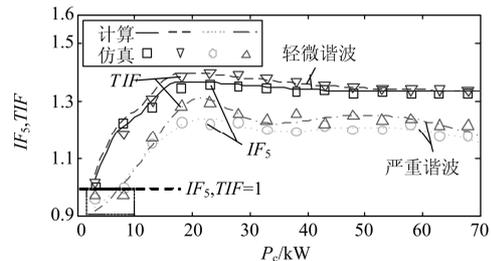


图 11 不同背景谐波下放大系数随充电功率变化

Fig. 11 Amplification coefficients of harmonic current versus charging power under different background harmonics

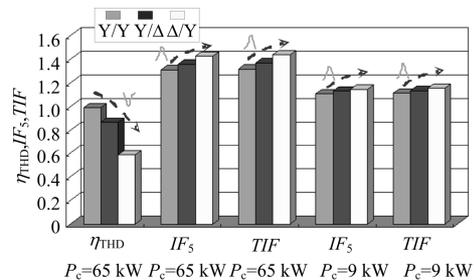


图 12 不同变压器接线方式下放大系数

Fig. 12 Amplification coefficients of harmonic current under different transformer winding connections

4 结论

本文研究采用三相不可控整流充电机的电动汽

车充电站谐波电流与各次谐波电压的耦合关系, 结合各次谐波和总谐波放大系数, 提出一种充电站谐波放大或有源滤波过载程度的定量解析方法, 以分析并联 APF 引起的充电电流谐波放大效应。含多台充电机的充电站算例分析表明, 总谐波放大系数与第 5 次谐波放大系数 IF_5 接近, 可直接采用 IF_5 修正有源滤波器的配置容量; 充电站有源滤波器的补偿相位差决定电流谐波放大效应是否出现, 而补偿率仅影响谐波放大系数的大小; 本文方法对电网背景谐波变化具有一定适应性, 变压器采用 Y/Y 接线方式时对谐波放大影响最小, 当采用 Y/ Δ 和 Δ /Y 接线时放大系数均有不同程度的上升。

参考文献

- [1] 葛文捷, 黄梅, 张维戈. 电动汽车充电站经济运行分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 15-21.
GE Wenjie, HUANG Mei, ZHANG Weige. Economic operation analysis of the electric vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 15-21.
- [2] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [3] 李娜, 黄梅. 不同类型电动汽车充电机接入后电力系统的谐波分析[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 170-174.
LI Na, HUANG Mei. Analysis on harmonics caused by connecting different types of electric vehicle chargers with power network[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 170-174.
- [4] 张谦, 韩维健, 俞集辉, 等. 电动汽车充电站仿真模型及其对电网谐波影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 159-164.
ZHANG Qian, HAN Weijian, YU Jihui, et al. Simulation model of electric vehicle charging station and the harmonic analysis on power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 159-164.
- [5] 周念成, 蒲松林, 王强钢, 等. 电动汽车快速充电站的储能缓冲系统控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 127-134.
ZHOU Niancheng, PU Songlin, WANG Qianggang, et al. Control strategy of energy storage buffer system for fast charging electric vehicle station[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 127-134.
- [6] 黄贵鸿, 雷霞, 杨毅, 等. 考虑风电与用户满意度的电动汽车两层智能充放电策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 85-97.
HUANG Guihong, LEI Xia, YANG Yi, et al. Two-layer smart charge-discharge strategies for electric vehicles considering wind generation and users' satisfaction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 85-97.
- [7] 连湛伟, 石欣, 克潇, 等. 电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线检测管理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 137-142.
LIAN Zhanwei, SHI Xin, KE Xiao, et al. The whole life cycle on-line detection and management system of power battery in the electric vehicle charging and exchanging station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 137-142.
- [8] 肖湘宁, 温剑锋, 陶顺, 等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 1-10.
XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, TAO Shun, et al. Study and recommendations of the key issues in planning of electric vehicles' charging facilities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 1-10.
- [9] ROH Y S, MOON Y J, GONG J C, et al. Active power factor correction (PFC) circuit with resistor-free zero-current detection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 630-637.
- [10] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [11] CROSIER R, WANG S. DQ-frame modeling of an active power filter integrated with a grid-connected, multifunctional electric vehicle charging station[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5702-5716.
- [12] KUPERMAN A, LEVY V, GOREN J, et al. Battery charger for electric vehicle traction battery switch station[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5391-5399.
- [13] 刘月贤, 王天钰, 杨亚宇, 等. 电动汽车充放电系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13):

- 70-76.
- LIU Yuexian, WANG Tianyu, YANG Yayu, et al. Modeling and simulation of electric vehicles' charge and discharge system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 70-76.
- [14] 陆康,刁倩.有源滤波器在不同网络中的应用分析[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):143-149.
- LU Kang, DIAO Qian. Analysis of active power filter applications in different network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 143-149.
- [15] 张超,马小平,张义君,等.间谐波环境下并联有源电力滤波器系统设计[J].电工技术学报,2015,30(20):118-127.
- ZHANG Chao, MA Xiaoping, ZHANG Yijun, et al. System design of shunt active power filter for inter-harmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 118-127.
- [16] YONG J, NASSIF A B, XU W. Effect of voltage crest shape on the harmonic amplification and attenuation of diode-bridge converter-based loads[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(10): 1033-1041.
- [17] NASSIF A B, XU W. Characterizing the harmonic attenuation effect of compact fluorescent lamps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1748-1749.
- [18] AHMED E E, XU W, ZHANG G. Analyzing systems with distributed harmonic sources including the attenuation and diversity effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2602-2612.
- [19] SAINZ L, BALCELLS J. Harmonic interaction influence due to current source shunt filters in networks supplying nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1385-1393.
- [20] 刘聪,戴珂,张树全,等.并联型APF补偿电压源型非线性负载时谐波电流放大效应的研究[J].中国电机工程学报,2011,31(27):21-28.
- LIU Cong, DAI Ke, ZHANG Shuquan, et al. Harmonic current amplification effect of voltage-source type nonlinear load under compensation by shunt APF[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 21-28.
- [21] YILMAZ M, KREIN P T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2151-2169.
- [22] 赵伟,孟金岭,陈锐民,等.电动汽车充换电设施电能计量及溯源方法[J].电力系统自动化,2013,37(11):113-118.
- ZHAO Wei, MENG Jinling, CHEN Ruimin, et al. Accurate measurement and traceability method of electrical energy for charging and discharging devices of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 113-118.
- [23] 雍静,陈亮,陈双燕.台式计算机负荷的频域谐波模型及衰减特性[J].中国电机工程学报,2010,30(25):122-129.
- YONG Jing, CHEN Liang, CHEN Shuangyan. Frequency domain harmonic model and attenuation characteristics of desktop PC loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 122-129.
- [24] 孙媛媛,徐文远.整流器的谐波分析方法[J].电力自动化设备,2009,29(3):10-15.
- SUN Yuanyuan, XU Wenyuan. Harmonic analysis method for converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 10-15.
- [25] 王佳佳,周念成,王强钢,等.电网电压不平衡下串联型12脉波整流装置的频域谐波建模[J].电工技术学报,2015,30(5):69-78.
- WANG Jiajia, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Frequency-domain harmonic modeling of the series 12-pulse rectifier under unbalanced voltage condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 69-78.

收稿日期:2015-05-07; 修回日期:2015-09-14

作者简介:

刘敏(1963-),男,高级技师,从事电力系统运行和变电站自动化培训科研工作;E-mail:852355691@qq.com

周晓霞(1985-),女,中专讲师,从事电力系统运行和继电保护培训科研工作;

陈慧春(1973-),女,高级讲师,从事电力系统运行培训工作。

(编辑 魏小丽)