

电动汽车充电站的谐波特性及抵消问题研究

电动汽车的发展和普及离不开充电站的建设,而充电站中的充电机为非线性负荷,会对电网产生谐波污染。因此,开展充电站谐波问题的研究具有实际意义。建立了某一参数下的不控整流型充电机和充电站的模型,重点研究了各台充电机在同一功率及不同功率两种运行情况下,各次谐波电流含有率HRI、电流总谐波畸变率THD和电流总需求畸变率TDD随充电机台数增加的变化规律,最后分析并仿真验证了充电机之间的谐波抵消机理。仿真表明,当充电站内的各台充电机均运行在同一功率下时,各台充电机所产生的谐波电流完全相同,并不存在谐波抵消现象;在充电机台数相同的情况下,不同功率时的各次谐波电流幅值及总需求畸变率均比相同功率时减小,其中一方面原因是由于谐波抵消的发生。此外通过仿真发现,高次谐波的抵消程度相对较大。

郭 静/国网山西省电力公司经济技术研究院 李 理/国网湖南供电公司
电力科学研究院 曹利坤/国网山西供电工程承装公司 罗莉琼/广东电网
梅州丰顺供电局

0 引言

近年来,石油资源紧缺,石油价格逐年上涨。发展新能源汽车已经成为世界各国政府发展国内工业、提高国民经济整体竞争力的必然选择^[1]。新能源汽车按动力电气化水平分为两类:一类是全部或大部分工况下主要由电动机提供驱动功率的电动汽车,称为“纯电驱动”电动汽车,例如纯电动汽车、插电式电动汽车、增程式电动汽车以及燃料电池电动汽车;另一类是动力电池容量较小,大部分工况下主要由内燃机提供驱动功率的电动汽车,称为“常规混合动力”电动汽车。从培育战略性新兴产业的角度看,发展电气化程度比较高的“纯电驱动”电动汽车是我国新能源汽车技术的发展方向。为满足电动汽车电

池充电或更换的需要必须建立电动车充电站,到2015年左右,计划在20个以上示范城市和周边区域建成由40万个充电桩、2 000个充换电站构成的网络化供电体系,满足电动汽车大规模商业化示范能源供给需求^[2]。

然而充电站的充电机主要采用电力电子技术,是一种高度非线性用电设备,存在对供电网的谐波污染问题,尤其在大型充换电站中,大量充电机同时工作,产生的谐波电流会对供电网及其他用电设备产生巨大的影响,对电网安全、稳定、经济、高效运行以及输配电网的建设提出新的挑战^[3]。因此,在电动汽车还未广泛应用前,积极开展充电站的谐波特性研究,为其谐波治理提供理论依据,对于电动汽车的推广有重要意义。

国内外学者对充电站谐波特性方面的研究尚处在探索阶段^[4-11]。充电站的谐波特性是基于单台充电机的谐波模型研究上的,对于单台充电机的谐波情况,文献[4]近似认为充电机的谐波全部是由整流器产生的,因而采用整流器的典型谐波数据作为充电机的谐波情况,误差较大。文献[5-6]则直接采用某一时刻充电机网侧电流的实测波形,而并未考虑谐波特性的时变性,即在一个充电周期内充电机的谐波特性是随时间变化的。文献[7]提出一种简化的充电站谐波工程算法,将充电机的谐波特性与充电功率对应起来,可计算一个充电周期内的谐波变化特性,具有借鉴意义。P.T. Staats等人提出了一种预测充电机群总谐波电



郭 静/工程师

关键词/Keywords

电动汽车·
充电机·
谐波特性·
谐波抵消·

流的方法^[5-6]，该方法采用概率统计的数学方法，得出充电站各次谐波幅值的概率密度分布，但该方法基于中心极限定理，需要有足够多的充电机样本来保证其准确性，而目前样本数量远远不足，因此分析结果有待进一步验证^[8]。文献[1]、文献[8-10]中均发现一个现象，即各次谐波含有率和电流总谐波畸变率可能会随着充电机台数的增加而减小，并依此认为是充电机间发生了谐波抵消，但目前尚无文献对该现象进行更深一步的解释与分析。

本文首先介绍了电动汽车不控型充电机的仿真模型，在此基础上搭建了充电站的模型，并对同一充电功率下的充电机群以及不同功率下的充电机群进行了仿真及谐波分析，最后从理论上分析了充电机间的谐波抵消机理，并以仿真予以验证，为电动汽车广泛应用后充电站的谐波研究提供一定的理论基础和参考。

1 充电机仿真模型

如图1所示，目前充电机的结构主要包括整流器、DC/DC功率变换器两部分。输入整流装置对三相交流电进行整流，经过滤波后，形成相对平稳的直流母线电压，以提供给后级DC/DC变换器，功率变换器经过DC/DC变换输出需要的直流，再次滤波后为纯电动汽车动力蓄电池充电。由于充电机的谐波主要是由整流部分产生的^[12]，并且高频功率变换器建模比较复杂，且计算量大，不利于观察整个充电过程中电流的变化情况，因此采用如图2所示的简化充电机模型，即在DC/DC变换环节的入口处进行戴维南等效，将端口后的环节统一等效为可变电阻 R_c 。其中，电阻的计算公式为

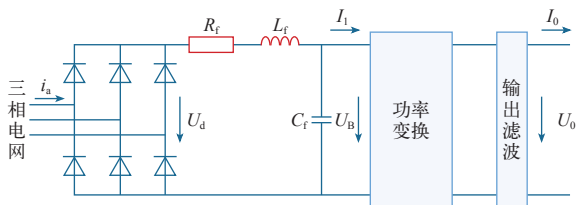


图1 充电机的结构示意图

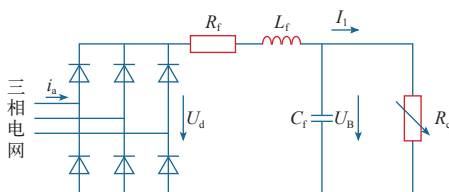


图2 充电机的简化等效模型

$$R_c = \frac{U_B}{I_1} = \frac{\eta U_B^2}{P_0} \quad (1)$$

式中， P_0 为充电功率； U_B 为DC/DC变换器的输入端口电压。

本文的研究对象为不可控型充电机，电池为恒流恒压型充电方式。采用PSCAD软件建立不控型充电机的仿真模型，其中充电机最大输出功率为9 kW，效率 η 为90%。

如图3所示，在一个充电周期内，充电机的充电功率 P_0 是时变的。由式(1)可知，充电机的等效电阻 R_c 也是随时间变化的，其变化曲线如图4所示。

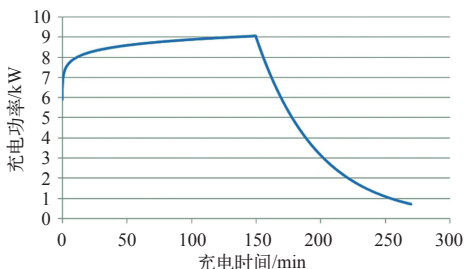


图3 充电功率曲线 P_0

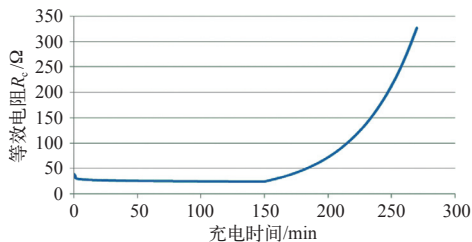


图4 等效电阻 R_c 的变化曲线

根据图4可得到某一时刻充电机等效电阻的概率密度分布，如图5所示。

2 充电站谐波特性的仿真与分析

2.1 充电站模型

基于上节所建立的充电机模型，充电站仿真

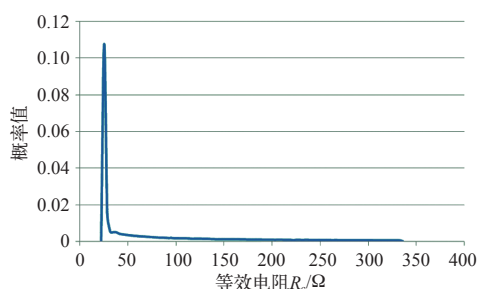


图5 充电器等效电阻值的概率密度分布

模型如图6所示。供电电源通过10 kV母线给充电站供电，经过10/0.4 kV配电变压器降压后为充电器供电。其中，10 kV电网的内电抗选取了最小运行方式下的经验数据，即0.38 Ω。变压器的容量为1.6 MV·A，采用角星接法。充电机的台数可以根据情况任意改变。

选择谐波含有率HRI、总谐波畸变率THD以及

总需量畸变率TDD作为衡量谐波特性的变量。其中，HRI与THD都是以基波幅值作为分母，其缺陷在于二者反映的是谐波幅值相对于基波的大小情况，当基波幅值很小时，较小幅值的谐波电流可能也会造成较大的THD值或HRI值，在某些情况下这两个变量并不能真实地反映谐波的严重情况^[13]。因此，另外采用了IEEE 519—1992定义的总需量畸变率TDD，它与THD的区别在于，TDD将THD分母的基波电流改为节点处在一段时间内的最大负荷电流^[14]，由于本文的研究对象仅限于单台或若干台充电器负荷，而不考虑节点处的负荷曲线，因此采用流过节点的额定电流作为TDD的分母，如式(2)所示。在一定程度上，TDD能够更加真实地反映谐波的严重程度。

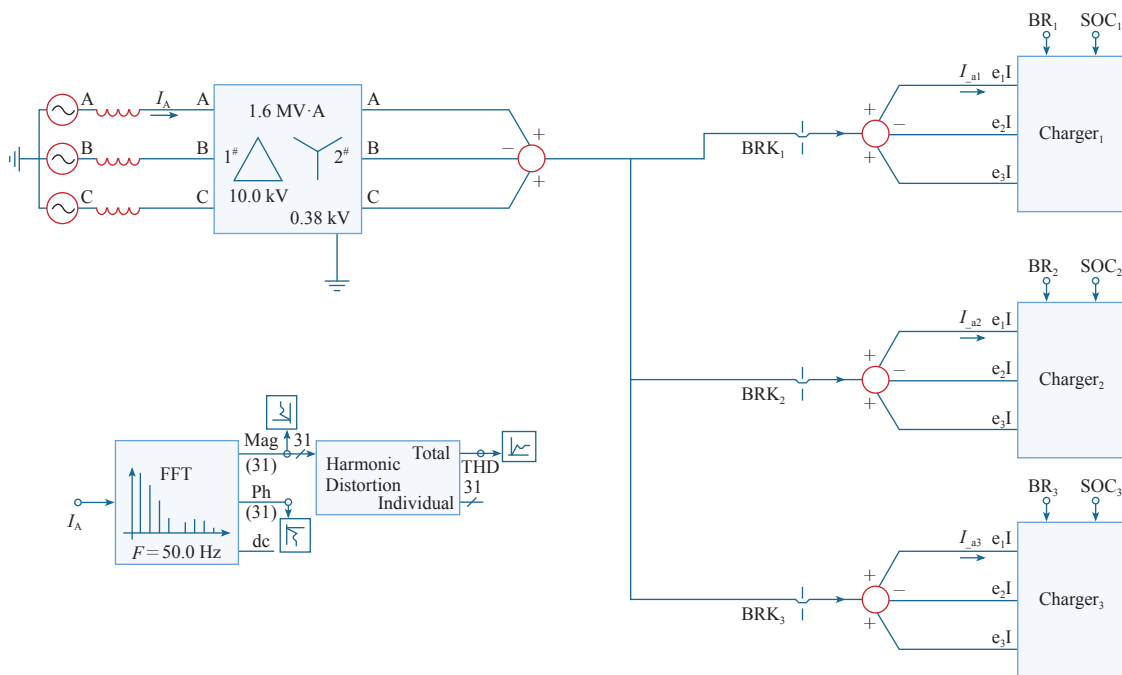


图6 充电站的仿真模型

$$TDD_k = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{max}} X_{hk}^2}}{X_N} \times 100\% \quad (2)$$

2.2 同一功率下谐波随充电机台数的变化趋势

假设某一时刻各台充电机的等效电阻均为25.73 Ω，即各台充电机的充电功率相同。图7为同一功率下电流HRI、电流THD随充电机台数的变化情况，图8为电流TDD随充电机台数的变化曲线。

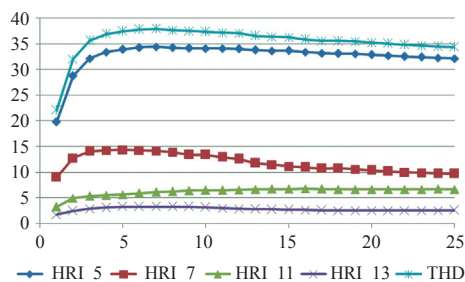


图7 谐波变量(%)随充电机台数的变化

从图7、图8中可以看出,当充电机台数较小时,随着充电机台数的增加,HRI和THD均有一定程度的增加;当充电机接入台数继续增加时,二者随台数的增加平缓降低,TDD近乎呈比例增加。

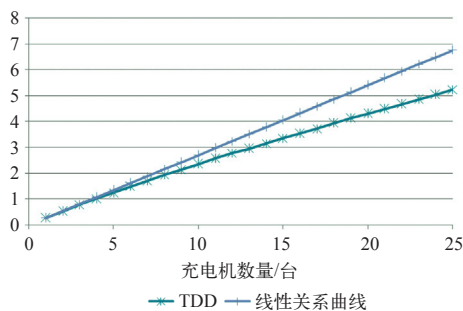


图8 TDD (%) 随充电机台数的变化

同样,将上述充电机直接接在理想电压源上,观察电流HRI、THD以及TDD随充电机台数的变化情况,如图9所示。可见,当不考虑系统及变压器的阻抗时,HRI以及THD均为恒定值,不随充电机的台数而发生变化。TDD则随充电机台数成比例增加,为线性关系。

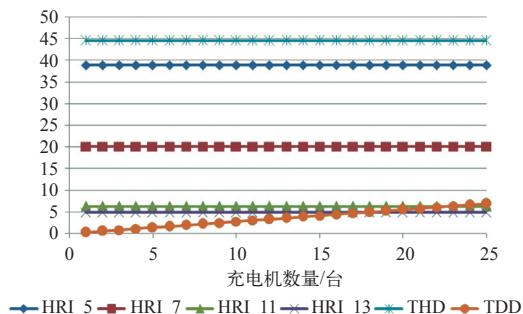


图9 忽略阻抗时,谐波量(%)随充电机台数的变化

当充电机均运行在同一功率下时,图7所表现出的谐波电流含有率HRI及THD的变化是由于系统侧内阻抗以及变压器阻抗的缘故,与谐波抵消无关。

2.3 不同功率下谐波随充电机台数的变化趋势

在充电站的实际运行中,各台充电机的运行功率不可能在任意时刻都完全相同。按照图5分布从中随机抽取15个数据作为15台充电机的等效电阻,共做了5次抽取试验,从而可得到15台充电机的THD平均值及TDD平均值。

同理,按此方法可得出不同台数的电流THD与TDD值。假设不考虑系统及变压器自身的阻抗,THD随充电机台数的变化曲线如图10所示。随着充电机台数的增加,THD发生了下降,并趋近保持在一个相对稳定的水平。

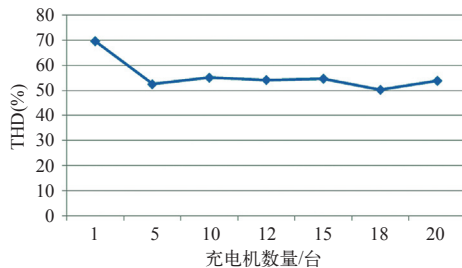


图10 THD (%) 随充电机台数的变化

图11为TDD值随充电机台数的变化曲线,从图11中可以看出,TDD值随充电机台数近乎成比例增长。

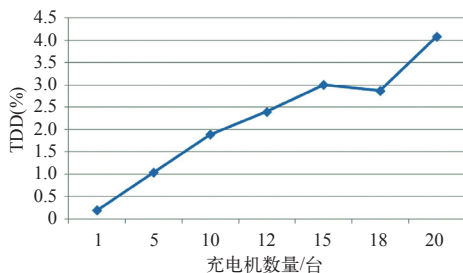


图11 TDD (%) 随充电机台数的变化

3 充电站谐波抵消现象的机理与仿真分析

3.1 谐波抵消的机理分析

众所周知,对于任意谐波源负荷,当负荷间存在相位差时,便会存在谐波抵消现象。一般来说,相位差越大,抵消效果越明显。

图12为整个充电周期内,充电机的各次谐波相位的变化曲线。从图12中可以看出,在一个充电周期内,由于充电功率的时变性,充电机的各次谐波相位也是不断变化的。对于充电机这一负荷,谐波相位的差异本质上是由于其充电功率的时变造成的。因此,通过理论分析可知,当各台充电机的充电功率不同时,将必然会发生一定程度上的谐波抵消现象。

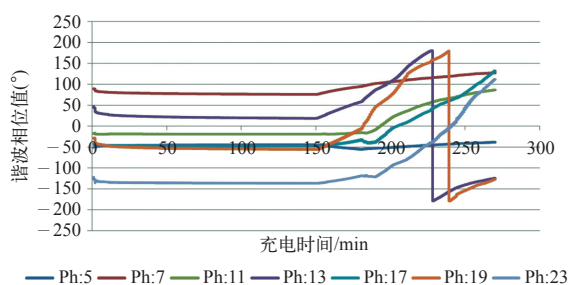


图12 不控型充电机在充电周期内的谐波相位变化曲线
(从上到下,依次是7次、13次、11次、5次和3次谐波)

3.2 仿真验证与分析

对15台充电机进行仿真,一种情况是各台充

电机的工况相同,即该时刻的等效电阻相同,均为 $25.73\ \Omega$;另一种情况是各台充电机的等效电阻并不相同,按照图5中的概率分布,从中随机抽取15个数据作为充电机的等效电阻。

下表为两种情况下各次谐波电流幅值和TDD值。由表中可以看出,与功率值相同的情况相比,当各台的功率值不同时,TDD值减小,各次谐波电流幅值也均发生了一定程度的减小,但减小的幅度并不相同。造成此结果的原因:一方面是各台充电机等效电阻的改变引起充电站总电流的变化;另一方面可能是充电机间发生了谐波抵消。

表 15台充电机在两种情况下的谐波结果对比

15台充电机	基波/A	5次谐波幅值/A	7次谐波幅值/A	11次谐波幅值/A	13次谐波幅值/A	TDD(%)
各台功率相同	228.4	88.8	45.8	14.47	11.17	4.19
各台功率不同	142.4	63.7	33.1	8.86	5.17	2.995

为了验证谐波抵消的存在,表中不同功率下的15台充电机的谐波相位分布散点图如图13所示。图13中的圆环由内向外依次是5次、7次、11次、13次、17次、19次以及23次谐波相位的分布。从图13中可以看出,各次谐波相位确实存在一定的差异,其中,5次、7次谐波相位分布相对集中,高次谐波的相位差异相对较大。由此可以推断,接在同一母线上的充电机,在充电功率不同的情况下,充电机间的谐波存在相位差,确实会发生谐波电流抵消现象,并且高次谐波的抵消

程度一般较大,占主要成分的低次谐波反而抵消作用很小。

4 结束语

建立了单台不控整流型充电机和充电站的仿真模型,仿真分析了各次谐波电流含有率HRI、电流总谐波畸变率THD和总需求畸变率TDD随充电机台数的变化规律,并对充电机间谐波抵消发生的机理进行了理论与仿真验证分析。研究表明:

1) 充电站的谐波特性(如THD、TDD、HRI及各次谐波幅值)受很多因素影响,如充电机台数、各充电机的充电功率大小、系统及变压器的阻抗等,因此单纯依靠这些变量的变化趋势并不能判断和衡量谐波抵消的发生,而只能通过相位的分布来判断谐波抵消的发生。

2) 当充电站内的各台充电机均运行在同一功率下时,各台充电机所产生的谐波电流完全相同,不存在谐波抵消现象。

3) 与同一功率的情况相比,当充电站各台充电机的运行功率不同时,各次谐波电流值及TDD值均发生了不同程度的下降,原因一方面是等效电阻本身的改变引起了幅值的变化,另一方面是

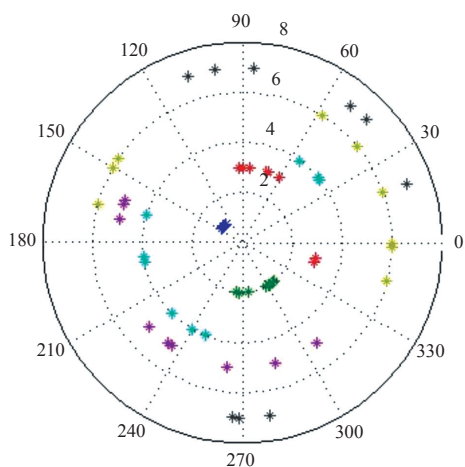


图13 15台充电机的各次谐波相位分布散点图

充电机间发生了谐波抵消。

4) 谐波抵消发生的根本原因是相位的差异, 对于接在同一位置的各台充电机, 运行功率的差异造成了各台间的相位差, 因此充电机谐波抵消的根本原因是同一时刻充电机的功率差异。且高次谐波的抵消程度一般较大, 占主要成分的低次谐波反而抵消作用很小。

参考文献

- [1] 滕乐天. 电动汽车充电机(站)设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 电动汽车科技发展“十二五”专项规划[EB]. <http://www.most.gov.cn/tztg/201204/W020120420547632346015.pdf>
- [3] 牛利勇. 纯电动公交充电站谐波分析的模型方法[J]. 高技术通信, 2008(9): 953-957.
- [4] Yang X G, Gui Q C, Pan A Q. Analysis of the effect of shanghai EXPO electric vehicle charging station on urban grid power quality [C]. 21st International Conference on Electricity Distribution, 2011: 6-9.
- [5] Staats P T, Grady W M, Arapostathis A, et al. A statistical method for predicting the net harmonic currents generated by a concentration of electric vehicle battery chargers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1258-1266.
- [6] Lu Y, Jiang J. Harmonic-study of electric vehicle chargers [C]. Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005, 3(3): 2404-2407.
- [7] 黄少芳. 电动汽车充电机(站)谐波问题的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [8] 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.
- [9] Bentley E C, Suwanapongkarl P, Weerasinghe S, et al. The interactive effects of multiple EV chargers within a distribution network [C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010: 1-6.
- [10] Chan M S W, Chau K T, Chan C C, et al. Modeling of electric vehicle chargers [C]. Industrial Electronics Society, Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1998.
- [11] Lewis L R, Cho B H, Lee F C, et al. Modeling, analysis and design of distributed power systems [C]. Power Electronics Specialists Conference, 1989: 152-159.
- [12] 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.
- [13] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [14] IEEE 519—1992 IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems [S].

(收稿日期: 2016-01-08) **EA**