

DOI: 10.7667/PSPC162038

不同充电模式下电动汽车充电站的仿真与谐波分析

邓磊, 刘敏, 应丽云, 孙江山

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 当前越来越多的电动汽车充电设施接入电网, 不同充电模式的充电设施接入电网产生的谐波污染将对电网造成不同的影响。对电动汽车充电站内不同充电模式充电机之间的相互影响进行 Simulink 仿真和谐波分析。首先, 建立电动汽车动力电池的仿真模型。其次, 建立电动汽车不同充电模式充电机的仿真模型。然后, 将动力电池仿真得到的充电曲线直接等效成时变电阻, 并作为连续信号直接输入充电机模型进行仿真。最后, 在不同充电场景下对不同充电模式充电机进行仿真, 分析了不同充电模式的充电机工作时相互影响的谐波规律。

关键词: 充电模式; 动力电池; 充电机; 谐波分析; Simulink 仿真

Simulation and harmonic analysis of electric vehicle charging station under different charging modes

DENG Lei, LIU Min, YING Liyun, SUN Jiangshan

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: More and more electric vehicle charging facilities are connected to the power grid now, and the harmonic pollution caused by the charging facilities under different charging modes will exert different effects on the power grid. This paper researches the Simulink simulation and harmonic analysis of the mutual influence between different charging modes charger in the charging station. Firstly, the simulation model of the electric vehicle power battery is established. Secondly, the simulation model of the electric vehicle charger under different charging modes is established. Thirdly, the power battery charging curve by simulation is equivalent to time-varying resistance, and it is input as a continuous signal to the charger model for simulation. Finally, different charging modes in different charging scenes are simulated, and harmonic mutual influence law of different charging modes charger on working is analyzed.

This work is supported by Guizhou Science and Technology Foundation (No. J[2012]2157).

Key words: charging mode; power battery; battery charger; harmonic analysis; Simulink simulation

0 引言

随着电动汽车不断普及, 越来越多的充电机将接入电网为电动汽车提供充电服务。电动汽车充电机作为非线性用电设备, 其产生的谐波污染越来越值得关注。电动汽车充电模式主要分为快充和慢充两种模式^[1-2]。慢充模式充电电流低, 约为 15 A, 充电时间长, 约为 8~10 h; 快充模式充电电流大, 约为 150~400 A, 充电时间短, 约为 20 min~2 h。因此, 电动汽车充电模式不同, 充电产生的谐波影响也有可能不同。现有研究中, 文献[3]建立了电动汽车充电站仿真模型, 并提出一种采用线性分段函数近似等效充电机非线性电阻的方法计算谐波。文献[4]建立了单台三相不可控整流充电机模型, 并

分析了多台充电机的谐波特征。文献[5]建立了单台充电机和充电站仿真模型, 研究了各次谐波电流含有率、电流总谐波畸变率和功率因数随电动汽车充电功率的变化规律及其随充电机台数增加的变化规律。文献[6]分析了由不同整流装置构成的充电机接入系统产生的谐波影响。文献[7]建立了含车载充电机的住宅区传统三相配电网和新型单相配电网仿真模型, 分析了车载充电机接入小区低压配电网产生的谐波特征。以上关于充电站谐波仿真研究多是将充电机的等效时变电阻进行离散化处理或线性分段函数处理, 未能体现电动汽车动力电池充电曲线的连续性, 同时当前研究单台充电机等效模型和多台同类型充电机同时工作的文献较多, 而研究不同类型充电机及不同充电模式充电机同时工作产生谐波影响的文献较少。由于电动汽车快充与慢充模式与充电机功率、动力电池充电特性及温度等紧密相关。

基金项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2012]2157号)

本文对电动汽车充电站内不同充电模式充电机的相互影响进行 Simulink 仿真和谐波分析。首先,建立了电动汽车动力电池的仿真模型并得出充电特性曲线;其次,建立了电动汽车不同充电模式充电机的仿真模型;再次,将动力电池的充电曲线直接等效成时变电阻,并作为连续信号直接输入充电机模型进行仿真;最后,在不同充电场景下分析了不同充电模式的充电机同时工作时的谐波规律,并从谐波影响角度考虑了如何选择充电机不同组合配置的方法,对于研究电动汽车接入电网的影响及指导电动汽车充电系统建设有积极意义。

1 电动汽车动力电池模型及仿真

电动汽车的动力电池主要有三种,即铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池。2006 年以来,由于锂离子电池技术的迅速发展,特别是安全性方面的大幅度提高,锂离子电池已逐步被应用于纯电动车和混合动力车^[8]。本文选择 2016 年最新上市的日产 Leaf 纯电动汽车动力电池参数进行仿真,具体参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 日产 Leaf 动力电池性能指标

Table 1 Performance indicators of Nissan Leaf power battery

| 电池容量/kWh | 电池单体数目 | 电池类型 |
|-----------|---------------|--------------|
| 30 | 48 | 复合锂离子电池 |
| 电池组额定电压/V | 能量密度/(W·h/kg) | 功率密度/(kW/kg) |
| 345 | 140 | 2.5 |

表 2 日产 Leaf 动力电池充电模式

Table 2 Charging modes of Nissan Leaf power battery

| 充电模式 | 充电电压 | 充电电流 | 充电时间 |
|------|---------|-----------|-----------|
| 模式一 | 120 VAC | 12 A | 16 h |
| 模式二 | 240 VAC | 15~30 A | 4~8 h |
| 模式三 | 480 VDC | 100~400 A | 15~25 min |

1.1 锂离子电池等效电路

本仿真采用 RINT 模型,模型设计简洁,计算简单,如图 1 所示。该模型用理想电压源 E 作为电池开路电压, R 为电池内阻, V 为电池与外电路接通后的端电压^[9]。

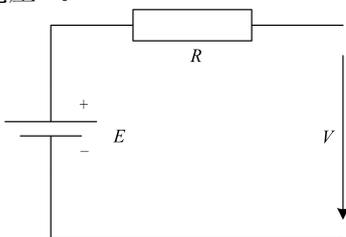


图 1 RINT 模型

Fig. 1 RINT model

1.2 锂离子电池仿真

电动汽车动力电池充电时,其荷电状态变化^[10-11]如式(1)。

$$SOC = SOC_0 + \frac{\int idt}{Q} \quad (1)$$

式中: SOC_0 为初始荷电状态; SOC 为当前荷电状态; i 为充电电流; Q 为电池容量。

动力电池电压和荷电状态 SOC 的函数关系^[12]为

$$E = E_0 - \frac{K}{SOC - SOC_0} + Ae^{-BQ(1-SOC+SOC_0)} \quad (2)$$

$$V = E - R \cdot i \quad (3)$$

式中: E 是电池的开路电压; E_0 是电池内电势; K 是偏置电压; A 是指数电压; B 是指数容量; R 是内阻; V 是电池两端的直流电压。根据式(1)~式(3)对电动汽车动力电池充电进行仿真,其 Matlab 仿真模型如图 2 所示。

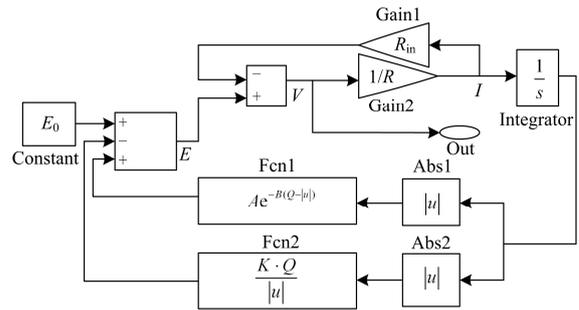


图 2 动力电池仿真模型

Fig. 2 Simulation model of power battery

电动汽车动力电池的充电方式与充电机的充电电流和电池本身充电性质紧密相关。在动力电池充电电流可接受范围内,充电机的功率越大,其充电电流越大,动力电池充电越快,充电完成时间越短^[13-16]。本文以容量为 30 kWh 的日产 Leaf 电动汽车动力电池在不同充电电流下充电为例进行仿真,其最快 15 min、400 A 快充模式和最慢 8 h、15 A 慢充模式的充电曲线如图 3 所示。

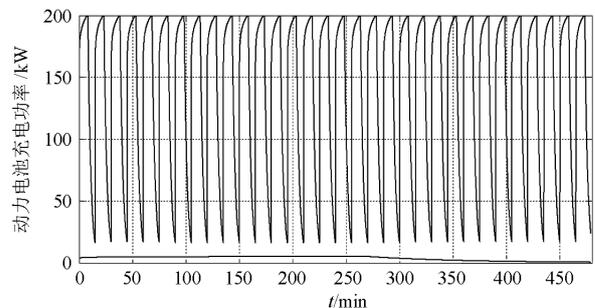


图 3 动力电池慢充与快充模式充电

Fig. 3 Slow charge and fast charge mode of power battery

2 不同充电模式充电机模型及仿真

2.1 充电机等效模型

目前, 主要研究和使用的电动汽车充电机结构如图 4 所示。三相桥式不可控整流电路对三相交流电进行整流^[17-18], 滤波后为高频 DC-DC 功率变换电路提供直流输入^[19], 功率变换电路的输出经过输出滤波电路后, 为动力电池充电。

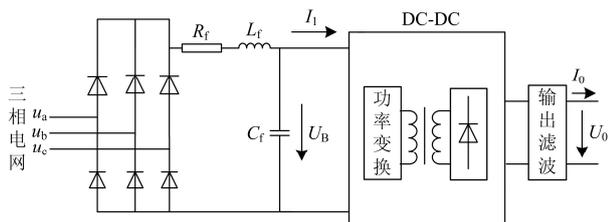


图 4 高频充电机的结构

Fig. 4 Structure of high frequency charger

现将图 4 中功率变换器部分进行等效, 从而进行仿真。相对工频周期而言, 电动汽车动力电池充电时间较长, 所以在一个或几个工频周期内, 都可以将充电机的输出电流和输出电压视为恒定的直流, 即图 4 中的 I_0 、 U_0 均为常数。因此, 可以认为高频功率变换环节工作在恒功率状态, 当输入电压 U_B 升高时, 输入电流 I_1 必然降低, 其输入阻抗表现为负阻抗特性。在低频范围内, 可以用一个非线性电阻 R_C 来近似模拟高频功率变换环节的等效输入电阻^[20-23], 非线性电阻 R_C 可近似表示如式(4)。充电机等效模型如图 5 所示。

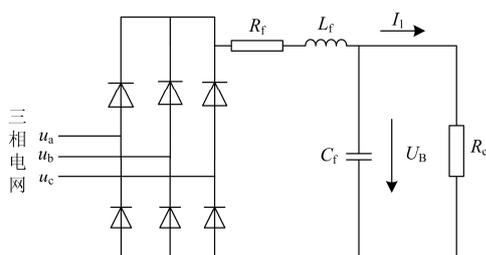


图 5 高频充电机等效模型

Fig. 5 Equivalent model of high frequency charger

充电功率与等效电阻关系如式(4)所示。由式(4)可知, 小电阻对应大功率充电, 大电阻对应小功率充电^[3]。

$$R_C = \frac{U_B}{I_1} = \frac{U_B^2}{P_1} = \frac{\eta U_B^2}{P_0} = \frac{\eta U_B^2}{U_0 I_0} \quad (4)$$

式中, η 为充电机效率。

2.2 充电机仿真模型

根据图 5 所示充电机的等效模型, 对电动汽车充电机进行 Simulink 仿真, 电动汽车充电机的仿真模块如图 6 所示, 其中等效电阻 R_C 的时变仿真模块如图 7。

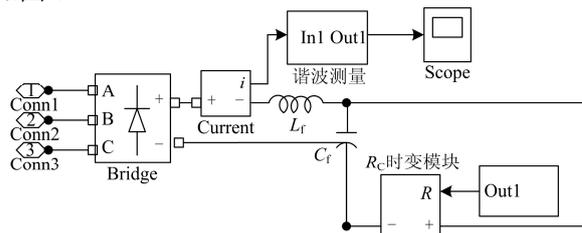


图 6 电动汽车充电机模块

Fig. 6 Electric vehicle charger module

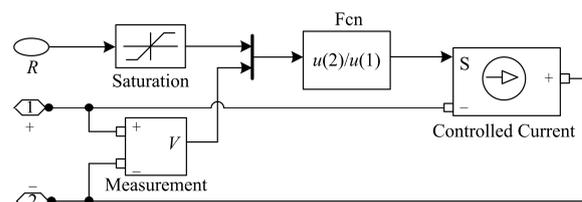


图 7 等效电阻 R_C 的时变模块

Fig. 7 Time varying module of equivalent resistance R_C

根据 2010 年国家电网公司发布的《电动汽车充电设施典型设计》中的设计标准^[24-25], 现将典型的 5 kW/35 kW/100 kW/200 kW 这 4 种功率的充电机在本文中作为不同充电模式的充电机进行 Simulink 仿真。电动汽车动力电池的充电模式与动力电池充电特性及充电机功率紧密相关。在第 1 节中, 仿真的日产 Leaf 动力电池最大充电电流可以达到 400 A, 最大充电功率可以达到近 200 kW。因此, 在接下来的仿真中, 可认为日产 Leaf 动力电池可以接受 5 kW/35 kW/100 kW/200 kW 这 4 种功率充电机的最大电流进行充电, 则 4 种充电机对日产 Leaf 动力电池充电时, 其输出功率仿真结果如图 8 所示。

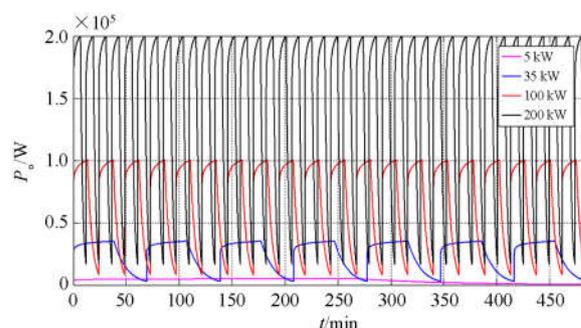


图 8 4 种充电机的输出功率

Fig. 8 Output power of four chargers

根据式(4)和图 8 中 4 种充电机的输出功率,可以得到 4 种不同充电模式充电机对应的等效电阻 R_C 如图 9 所示。

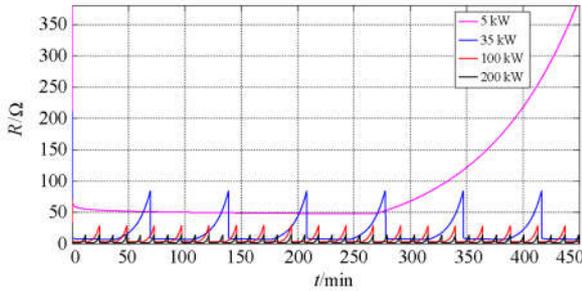


图 9 4 种充电机的等效电阻

Fig. 9 Equivalent resistance of four chargers

将图 9 中 4 种不同充电模式充电机对应的等效电阻 R_C 的时变曲线作为各充电机内部的等效电阻 R_C 信号, 分别对 4 种充电机进行 Simulink 仿真, 5 kW 充电机仿真模型如图 10, 同理可得其他 3 种充电机仿真模型, 其各自的电流总谐波畸变率如图 11—图 14 所示。

由图 11 可知, 单台 5 kW 充电机对第 1 节中动力电池充电需要 8 h, 其高压侧电流总谐波畸变率为 0.2652, 其最大值为 0.33; 谐波电流含量为 0.1951 A, 其最大值为 0.2475 A。

由图 12 可知, 单台 35 kW 充电机对该动力电池充电需要 70 min, 其高压侧电流总谐波畸变率为 0.2251, 最大值为 0.35; 谐波电流含量为 0.5294 A, 最大值为 0.7245 A。

由图 13 可知, 单台 100 kW 充电机对该动力电池充电需要 25 min, 其高压侧电流总谐波畸变率为 0.2182, 最大值为 0.3; 谐波电流含量为 1.4469 A, 最大值为 2.179 A。

由图 14 可知, 单台 200 kW 充电机对该动力电池充电需要 15 min, 其高压侧电流总谐波畸变率为 0.2067, 最大值为 0.242; 谐波电流含量为 2.7408 A, 最大值为 3.528 A。

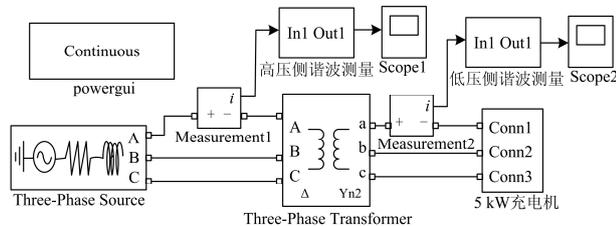


图 10 单台 5 kW 充电机仿真图

Fig. 10 Simulation diagram of 5 kW charger

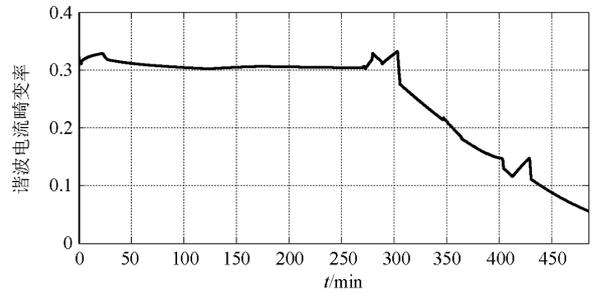


图 11 单台 5 kW 充电机谐波电流畸变率

Fig. 11 Harmonic current distortion rate of 5 kW charger

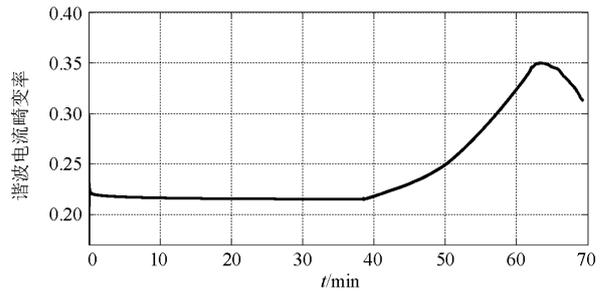


图 12 单台 35 kW 充电机谐波电流畸变率

Fig. 12 Harmonic current distortion rate of 35 kW charger

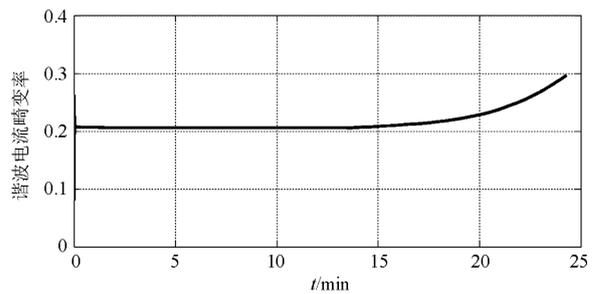


图 13 单台 100 kW 充电机谐波电流畸变率

Fig. 13 Harmonic current distortion rate of 100 kW charger

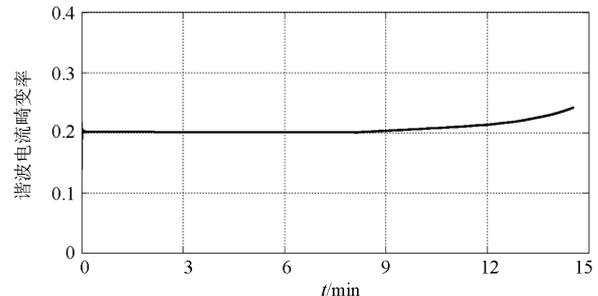


图 14 单台 200 kW 充电机谐波电流畸变率

Fig. 14 Harmonic current distortion rate of 200 kW charger

由此可知, 当大功率充电机进行大电流快充时, 充电电流越大, 产生的谐波电流越大, 电流总谐波畸变率越小。

3 充电站内不同充电模式充电机仿真及谐波分析

3.1 7台5kW充电机同时运行仿真

当7台5kW充电机同时工作时,其产生的谐波电流和谐波畸变率如图15、图16所示。由图15、图16可知,高压侧电流总谐波畸变率为0.45,谐波电流含量为1.3A,该谐波电流含量小于单台5kW充电机工作时谐波含量的7倍代数值,这符合充电机产生的谐波存在相互抵消的现象,充电机台数的增加可能致使各次谐波含量减小^[5]。同时在相同充电需求下,7台5kW充电机同时工作产生的谐波电流含量和电流总谐波畸变率都大于单台35kW充电机工作时产生的谐波。

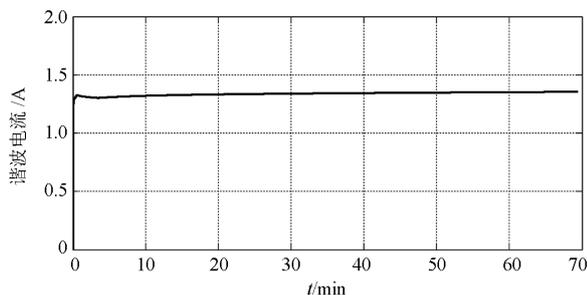


图 15 7台5kW充电机同时工作谐波电流

Fig. 15 Harmonic current of seven 5 kW chargers

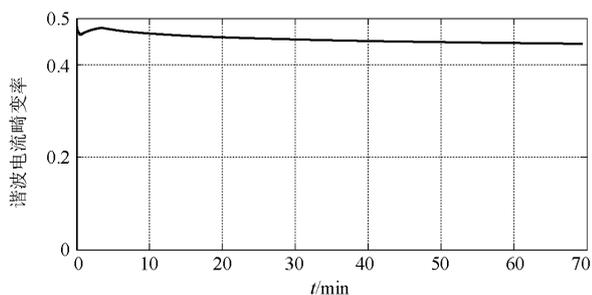


图 16 7台5kW充电机同时工作谐波电流畸变率

Fig. 16 Harmonic current distortion rate of seven 5 kW chargers working simultaneously

3.2 4台不同充电模式充电机同时运行仿真

当4种不同充电模式充电机同时工作时,其Simulink仿真图如图17所示,其产生的谐波电流和谐波畸变率如图18、图19所示。由图18、图19可知,其总谐波畸变率为0.21,最大值为0.35;谐波电流含量为4A,最大值为5A。该总谐波畸变率的最大值不超过任意单台充电机的最大值,其最小值小于任意单台充电机的最小值。

充电机的功率越大,输出电流越大,对谐波电流及谐波畸变率影响越大,以上4种充电机同时工

作时,200kW充电机占主要影响,5kW充电机的影响几乎不明显。

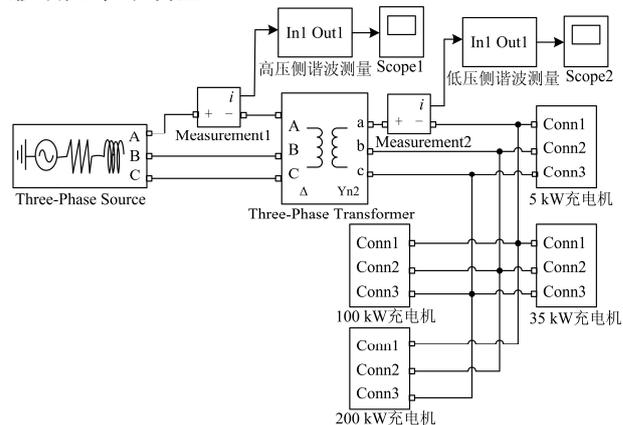


图 17 4台不同充电模式充电机同时工作仿真图

Fig. 17 Simulation diagram of four chargers working simultaneously under different charging modes

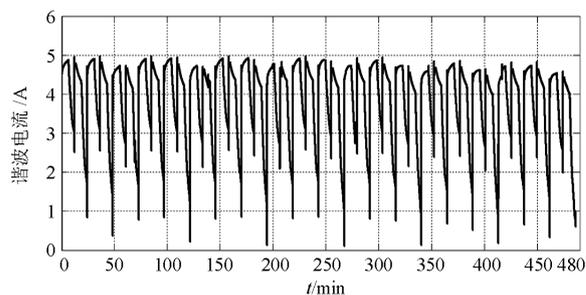


图 18 4台不同充电模式充电机同时工作谐波电流

Fig. 18 Harmonic current of four chargers working simultaneously under different charging modes

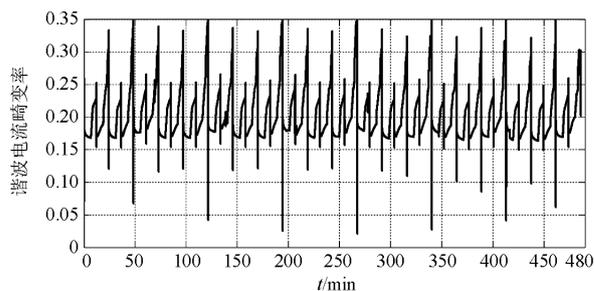


图 19 4台不同充电模式充电机同时工作谐波电流畸变率

Fig. 19 Harmonic current distortion rate of four chargers working simultaneously under different charging modes

3.3 不同充电模式充电机定时投入运行仿真

1) 当单台200kW充电机从0min时开始工作,在15min时将100kW充电机投入工作,在40min时将35kW充电机投入工作,在65min时将5kW充电机投入工作。具体谐波电流含量及谐波电流畸变率的仿真结果如图20、图21所示。

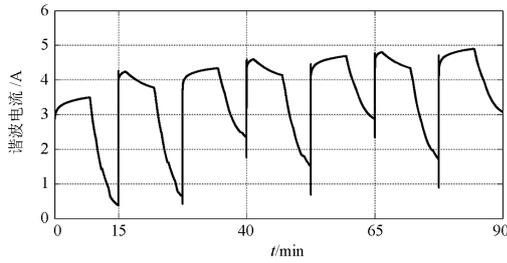


图 20 单台 200 kW 充电机定时投入其他 3 台充电机后的谐波电流

Fig. 20 Harmonic current of 200 kW charger timing input the other three

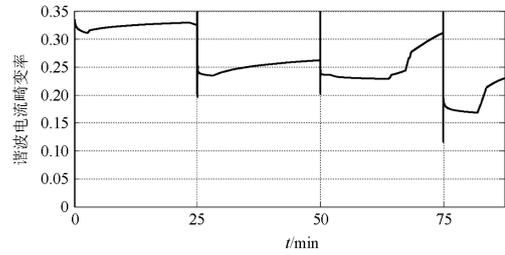


图 23 单台 5 kW 充电机定时投入其他 3 台充电机后的谐波电流畸变率

Fig. 23 Harmonic current distortion rate of 5 kW charger timing input the other three

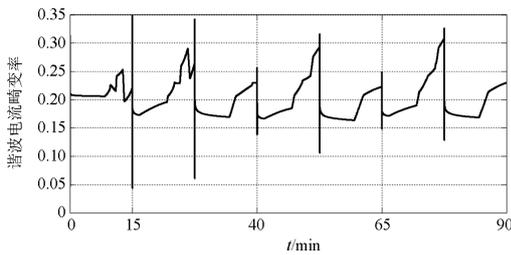


图 21 单台 200 kW 充电机定时投入其他 3 台充电机后的谐波电流畸变率

Fig. 21 Harmonic current distortion rate of 200 kW charger timing input the other three

根据 3.2 节中的分析可知,由于 200 kW 充电机的最大充电电流影响,当 4 种不同充电模式共同工作时,200 kW 充电机占主要作用。当在 15 min、40 min、65 min 依次投入更小电流充电机工作时,影响并不明显。但仍可看出电流随着充电机增多而增加且不等于线性代数之和。同时可看出在投入其他充电机运行后,谐波电流畸变率的波动范围变大,谐波电流畸变率的最小值有略微下降。

2) 当单台 5 kW 充电机从 0 min 时开始工作,在 25 min 时将 35 kW 充电机投入工作,在 50 min 时将 100 kW 充电机投入工作,在 75 min 时将 200 kW 充电机投入工作。具体谐波电流含量及谐波电流畸变率的仿真结果如图 22、图 23 所示。

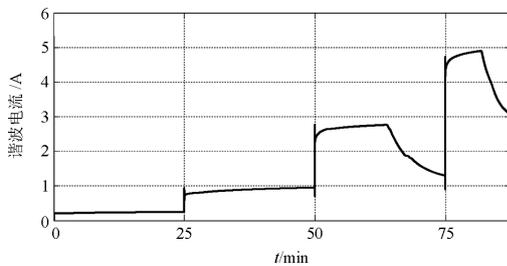


图 22 单台 5 kW 充电机定时投入其他 3 台充电机后的谐波电流

Fig. 22 Harmonic current of 5 kW charger timing input the other three

如以上所述,小电流慢充充电机在 4 种充电机相互作用时影响最小,所以受到其他充电机影响也就越大。由图 23 可知,随着投入运行充电机台数的增多,谐波电流畸变率的波动范围也变大了。同时总谐波电流畸变率也随着不断投入大电流快充充电机而变小。

3.4 相同充电需求的不同配置方案比较

若现有一个容量为 800 kW 的电动汽车充电站需要规划建设,在满足充电需求的情况下,现有如下 4 种充电站配置的候选方案,以下分别对 4 种候选方案进行仿真分析,比较其谐波影响并做出选择。4 种候选方案仿真产生的谐波电流和谐波畸变率结果如图 24—图 31 所示。

候选方案一: 4 个 200 kW 充电机

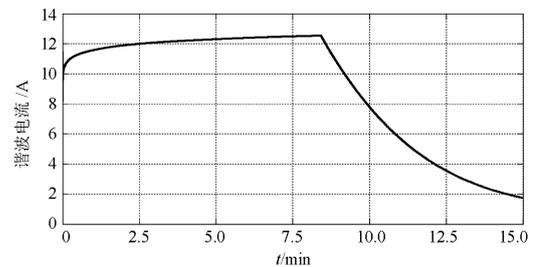


图 24 候选方案一的谐波电流

Fig. 24 Harmonic current of candidate scheme one

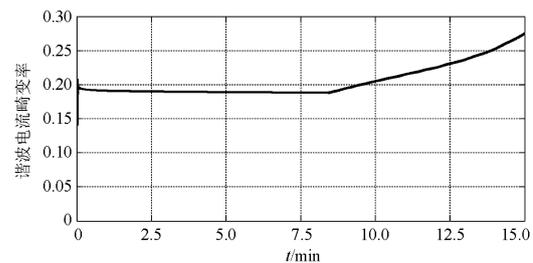


图 25 候选方案一的谐波电流畸变率

Fig. 25 Harmonic current distortion rate of candidate scheme one

候选方案二: 8 个 100 kW 充电机

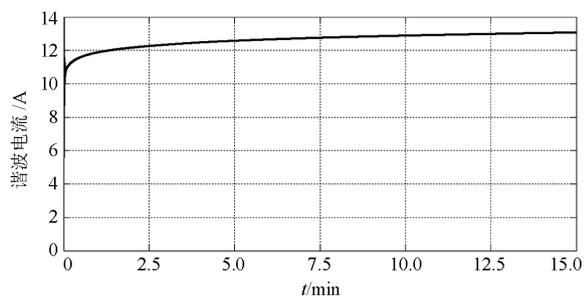


图 26 候选方案二的谐波电流

Fig. 26 Harmonic current of candidate scheme two

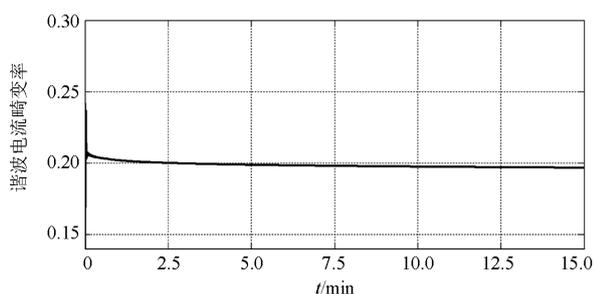


图 27 候选方案二的谐波电流畸变率

Fig. 27 Harmonic current distortion rate of candidate scheme two

候选方案三: 2 个 200 kW 和 4 个 100 kW 充电机

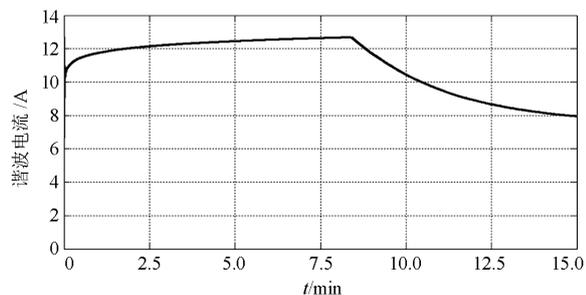


图 28 候选方案三的谐波电流

Fig. 28 Harmonic current of candidate scheme three

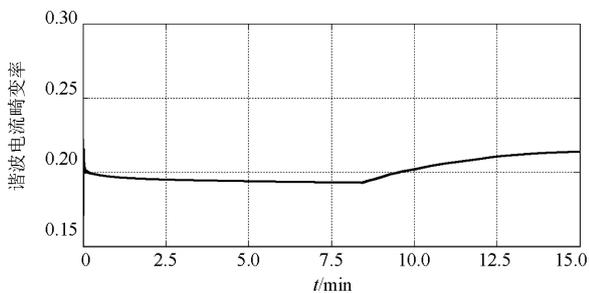


图 29 候选方案三的谐波电流畸变率

Fig. 29 Harmonic current distortion rate of candidate scheme three

候选方案四: 4 个 100 kW, 10 个 35 kW 和 10 个 5 kW 充电机

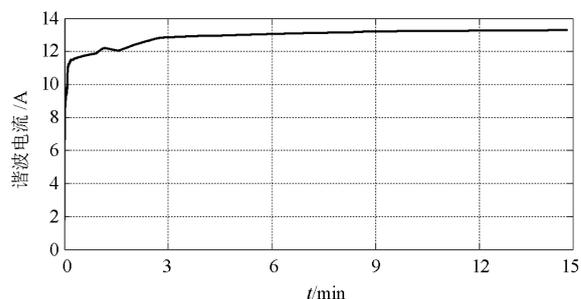


图 30 候选方案四的谐波电流

Fig. 30 Harmonic current of candidate scheme four

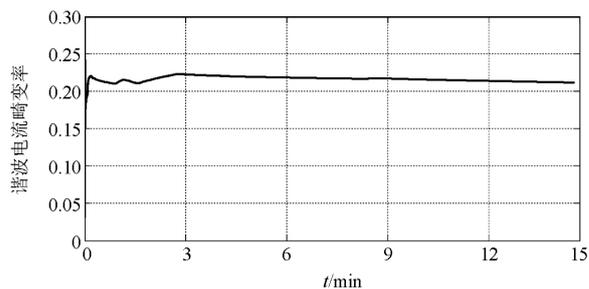


图 31 候选方案四的谐波电流畸变率

Fig. 31 Harmonic current distortion rate of candidate scheme four

根据 4 种候选方案充电站的谐波仿真结果比较 4 种方案的谐波影响, 如表 3 所示。

表 3 4 种方案的谐波比较

Table 3 Harmonic comparison of four schemes

| | 充电机配置 | 谐波电流含量/A | 总谐波电流畸变率 |
|-----|---------------------------------------|----------|----------|
| 方案一 | 4 个 200 kW | 9.27 | 0.19 |
| 方案二 | 8 个 100 kW | 12.02 | 0.19 |
| 方案三 | 2 个 200 kW 4 个 100 kW | 11.12 | 0.20 |
| 方案四 | 4 个 100 kW 10 个 35 kW 10 个 5 kW | 12.94 | 0.22 |

由表 3 可知, 若以上 4 种方案都符合实际充电需求, 则从谐波影响的角度选择方案一。若实际需求不同, 可以将实际充电需求与谐波影响结合起来, 综合考虑电动汽车充电设施的规划方案。

4 结论

本文通过建立电动汽车动力电池的仿真模型、不同充电模式充电机的仿真模型和充电站的仿真模型, 对电动汽车充电站内不同充电模式充电机的相互影响进行 Simulink 仿真和谐波分析, 并从谐波影响角度考虑了如何选择充电机不同组合配置的方法, 研究表明:

1) 不同充电模式充电机单独运行时, 充电电流越大, 产生的谐波电流越大, 电流总谐波畸变率却越小。

2) 7 台 5 kW 充电机同时工作时, 谐波电流含量小于单台 5 kW 充电机工作时谐波含量的 7 倍代数值, 符合充电机产生谐波存在相互抵消的现象, 充电机台数的增加可能致使各次谐波含量减小。

3) 在相同充电需求下, 7 台 5 kW 充电机同时工作产生的谐波电流含量和电流总谐波畸变率都大于单台 35 kW 充电机工作时产生的谐波。

4) 4 台不同充电模式充电机同时工作时, 充电机的功率越大, 输出电流越大, 对谐波电流及谐波电流畸变率影响越大, 200 kW 充电机占主要影响, 5 kW 充电机的影响几乎不明显。

5) 当 1 台充电机工作时, 投入其他充电机, 谐波电流畸变率的波动范围变大。同时总谐波电流畸变率也随着不断投入大电流快充充电机而变小。

6) 在满足实际充电需求基础上, 选择快充模式的大功率充电机可以降低谐波影响和谐波治理成本。

参考文献

- [1] 国家电网公司营销部. 电动汽车智能充换电服务网络建设与运营[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [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] 黄梅, 黄少芳. 电动汽车充电站谐波的工程计算方法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 20-23.
HUANG Mei, HUANG Shaofang. A harmonic engineering calculation method for electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 20-23.
- [4] 赵伟, 姜飞, 涂春鸣, 等. 电动汽车充电站并网谐波分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 61-66.
ZHAO Wei, JIANG Fei, TU Chunming, et al. Harmonic currents of grid-connected EV charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 61-66.
- [5] 张谦, 韩维, 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 Wei, 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.
- [6] 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.
- [7] 魏大钧, 孙波, 张承慧. 电动汽车车载充电机接入住宅区配电网谐波研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 13-18.
WEI Dajun, SUN Bo, ZHANG Chenghui. Harmonics caused by connecting EV on-board chargers to residential distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 13-18.
- [8] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.
SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7.
- [9] 柏林. 电动汽车动力电池的电气特性分析及模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
BAI Lin. Electrical characteristics analysis and the model research of electric vehicle power battery[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [10] 薛松, 袁越, 傅质馨, 等. 考虑电动汽车入网技术的电力系统机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 86-92.
XUE Song, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Unit commitment in power system considering vehicle-to-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 86-92.
- [11] 刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 等. 电动汽车入网一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 90-95.
LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 90-95.
- [12] 屠影. 电动汽车充电模式及其负荷特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
TU Ying. The analysis of electric vehicle charging mode and its load characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [13] 艾新平, 杨汉西. 电动汽车与动力电池[J]. 电化学, 2011, 17(2): 123-133.
AI Xinping, YANG Hanxi. Electric vehicles and power batteries[J]. Electrochemistry, 2011, 17(2): 123-133.
- [14] 刘炎金, 李新静, 张佳璐, 等. 锂离子动力电池的不同

- 充电方式[J]. 电源技术, 2015, 39(9): 1846-1848.
- LIU Yanjin, LI Xinjing, ZHANG Jiarong, et al. Different charging modes of power lithium-ion battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(9): 1846-1848.
- [15] 唐哲慈, 郭春林, 贾东明, 等. 电动汽车动力电池测试、建模与仿真[J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2612-2615.
- TANG Zheci, GUO Chunlin, JIA Dongming, et al. Testing, modeling and simulation of electric vehicle batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(12): 2612-2615.
- [16] 牛利勇, 时玮, 姜久春, 等. 纯电动汽车用磷酸铁锂电池的模型参数分析[J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 127-132.
- NIU Liyong, SHI Wei, JIANG Jiuchun, et al. Model parameters analysis of lithium iron phosphate battery for electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(2): 127-132.
- [17] 林鑫. 不同类型的电动汽车充电站的谐波分析[J]. 电气开关, 2015, 6(6): 23-26.
- LIN Xin. Harmonic analysis of electric vehicle charging stations[J]. Electric Switchgear, 2015, 6(6): 23-26.
- [18] 曹以龙, 黄锦, 赵转. 电动汽车充电机中 PWM 整流器的性能研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(2): 102-107.
- CAO Yilong, HUANG Jin, ZHAO Zhuan. Performance study on PWM rectifier of electric vehicle charger[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(2): 102-107.
- [19] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [20] 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, 1: 152-159.
- [21] 刘国海, 魏明洋, 陈兆岭. 电动汽车充电机谐波抑制工作机理的研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(12): 11-13.
- LIU Guohai, WEI Mingyang, CHEN Zhaoling. Study on harmonics suppression mechanism of electric vehicle charging[J]. Power Electronics, 2011, 45(12): 11-13.
- [22] 魏哲林, 袁越, 傅质馨. 电动汽车充电机谐波模型的研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 61-66.
- WEI Zhelin, YUAN Yue, FU Zhixin. Study of harmonic model for the electric vehicle charger[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2): 61-66.
- [23] 刘敏, 周晓霞, 陈慧春, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 36-43.
- LIU Min, ZHOU Xiaoxia, CHEN Huichun, et al. Analysis and calculation on harmonic amplification effect of electric vehicle charging station using three-phase uncontrolled rectification charger[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 36-43.
- [24] 许晓慧, 徐石明. 电动汽车及充换电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [25] 许庆强, 寇英刚, 马建伟, 等. 电动汽车充换电设施典型设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 118-124.
- XU Qingqiang, KOU Yinggang, MA Jianwei, et al. Research on typical design scheme of charging/battery swap infrastructure for electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 118-124.

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2017-02-14

作者简介:

邓磊(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 295025176@qq.com

刘敏(1972—), 女, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力投资规划、电力市场、风险管理及智能配电网。E-mail: minliu666@qq.com

(编辑 魏小丽)