

含大规模电动汽车的配电网保护技术研究

郭煜华, 范春菊

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 对基于三相不可控整流桥和 DC/DC 高频隔离变换器类型的充电机进行了建模与仿真, 分析了充电机作为负载的运行特性。在分析电动汽车用户用车行为的基础上, 采用蒙特卡洛方法求出了住宅区 1 500 辆电动汽车充电功率日负荷曲线。针对充电负荷的负载特性及其对配电网继电保护的影响, 提出了基于无功功率突变量启动的过电流保护方案, 且给出了详细的整定方法及其保护的動作特性。使用 PSCAD 进行了方案仿真分析, 仿真结果验证了所提出的含大规模电动汽车的配电网的配电线路保护方案的有效性。

关键词: 电动汽车; 充电功率曲线; 配电网保护; 无功功率突变量; PSCAD

Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles

GUO Yuhua, FAN Chunju

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The model of the charge pile based on the three phase diode bridge rectifier and the DC/DC high-frequency isolated converter is built and simulated in PSCAD, then the load characteristic of the charge pile is analyzed. Based on the analysis of the way how users use their electric vehicles, the Monte Carlo method is applied to find out the daily load curve of 1 500 electric vehicles' charging power. Considering the charging load's characteristic and its influence on the current protection of the power distribution line, the over current protection based on the reactive power fault component is proposed. The detailed setting method and the operation characteristics of the protection are given. The protection scheme is simulated using PSCAD, and the simulation result verifies the effectiveness of the proposed line protection scheme of the distribution network including large-scale electric vehicles.

Key words: electric vehicles; charging power curve; distribution network protection; reactive power fault component; PSCAD

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0014-07

0 引言

电动汽车是一种新能源汽车, 使用电能作为能量来源, 节能、环保, 逐渐受到了人们的重视。电动汽车蓄电池通过充电装置进行充电。充电装置与蓄电池有多种类型, 文献[1-9]对不同类型的充电装置与蓄电池进行了建模与仿真验证, 给出了电动汽车的充电特性。

目前应用较为广泛的充电装置为固定式充电机, 常大规模建设于住宅区域、办公区域等。当电动汽车规模的不断扩大时, 大量电动汽车入网充电

的行为会对电网造成一定影响^[10-18]: 一方面电动汽车用户的用车行为具有随机性, 另一方面电动汽车充电功率较大, 大量电动汽车同时入网充电会造成用电负荷的增加。负荷的增加对继电保护是一个不利的因素。文献[19]提出了一种电动汽车充电站的保护方案, 采用常规的电流速断保护。针对住宅区式大规模电动汽车充电负荷的配电网保护技术仍然有待研究。

传统配电网的保护方式主要是三段式电流保护。对于含有大规模电动汽车充电负荷接入的配电线路, 随着电动汽车的发展与规模的增加, 若仅仅提高保护定值以躲开负荷电流, 在较长线路末端发生短路时, 短路电流较小, 保护灵敏度降低, 保护可能无法动作, 对电网的稳定性产生严重威胁。本

基金项目: 教育部科技项目 (大型风电场电能储存与转换关键) (113023A)

文对大规模电动汽车的入网充电行为进行了分析,在此基础上针对配电网电流保护受到的影响,提出了一种新的配电网保护方案,即基于功率因数突变变量的电流保护方案,并对该方案进行了仿真,验证了方案的有效性。

1 电动汽车充电负荷特性

电动汽车充电负荷具有时变、非线性、谐波大等特点。大规模电动汽车入网充电时,由于用户用车行为的因素,充电负荷会出现较大波动,需要分析影响充电负荷变化的因素。

1.1 单台电动汽车充电机的建模及其特性分析

为了分析大规模电动汽车入网充电行为,首先需要单台电动汽车充电机进行建模,分析充电负荷的特点。

电动汽车充电机整体结构复杂,可实现过流保护、过压保护、实时通信、人机交互、电费计量等功能。充电器从充电机诞生至今,其主电路结构不断优化,性能也逐渐提升。目前市场上主要的充电桩或车载充电机主电路由三相不可控整流装置和隔离型高频 DC/DC 变换器两部分构成,其结构如图 1 所示^[3]。三相不可控桥式整流电路由三组上下桥臂的二极管组成,不需要复杂的驱动电路,输出纹波较小,适合做充电机的第一级电路。为进一步减小纹波,可在下一级电路前加入平波电抗器与电容器。

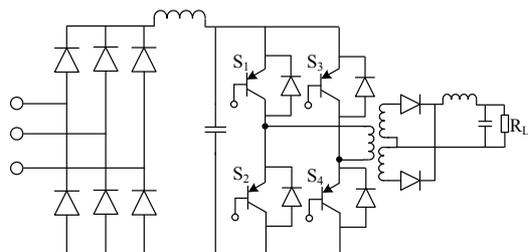


图 1 电动汽车充电机模型

Fig. 1 Model of EV charger

第二级电路采用全桥型 DC/DC 隔离变换器,上下桥臂共有 4 个开关元件 $S_1 \sim S_4$,再经过隔离变压器和滤波装置输出直流电压。 S_1 和 S_4 为一组, S_2 和 S_3 为另一组,每组元件同时开断。为保证电源不直接短路,控制信号的占空比必须小于 0.5,通过改变占空比可以调节输出电压的大小。在前半周期内, S_1 和 S_4 先关合,后断开;在后半周期内, S_2 和 S_3 先关合,后断开。

按照图 1 的结构,在电磁暂态仿真软件 PSCAD 中搭建充电机的模型,仿真测试其特性。经滤波器滤除 5、7、11 次谐波后的稳定三相电流如图 2 所示。

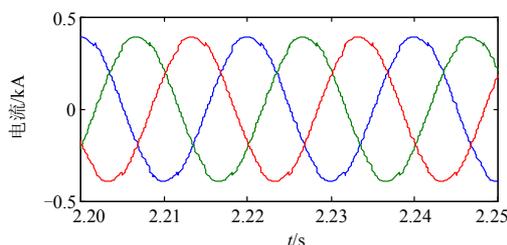


图 2 三相输入电流

Fig. 2 Three phases input current

从图 2 可以看出,滤波后,负载电流的总谐波降低了很多,与正弦波非常接近。由于充电机采用了高频开关电路,负荷性质接近与纯电阻电路,其功率因数可达 98%,接近于单位功率因数。另外,由于充电机电路三相对称,因此输入电流只有正序分量,负序和零序分量极低。经仿真测试,负序电流 I_2 仅为正序电流的 0.02%,零序电流 I_0 更小,均可忽略不计。综上所述,输入充电机的负载电流波形具有以下特点:(1) 经过谐波治理后,谐波分量减小,波形畸变率较小;(2) 电动汽车的功率因数较高,接近于 1;(3) 三相基本对称,无负序和零序分量。

1.2 大规模电动汽车入网充电负荷特性分析

电动汽车充电时负载功率较大,大规模电动汽车同时入网充电会对配电网造成一定影响。电动汽车用户的用车行为、充电机充电过程的功率变化情况都会直接影响到充电负荷的波动情况。为分析充电负荷的特性,需要建立大规模电动汽车入网充电的模型。根据目前国内外电动汽车的发展情况,本文分析住宅区式大规模电动汽车入网充电的负荷变化情况,研究对象为家用型电动汽车。

设住宅区内家用型电动汽车总数为 1 500 辆,假设其蓄电池容量在 20~30 kWh 区间内均匀分布。而电动汽车耗电量情况差别较大,不同车型的耗能水平不同,根据对多款车型的调查,假设每百公里的耗电量在 10~30 kWh 内均匀分布。则每辆电动汽车的日剩余电量百分比计算公式为

$$S = \left(1 - \frac{L}{C} \times \frac{P}{100} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: S 为剩余电量百分比(SOC); P 为每百公里耗电量; L 为日行驶里程; C 为蓄电池容量。求出 S 后,按照文献[2]的功率曲线求出蓄电池在该 SOC 下开始充电后充电功率与时间的函数曲线。

大规模电动汽车充电时,每辆车的日行驶里程、充电起始时间等用车行为参数按照文献[11]中的概率密度函数随机分布。对 1 500 辆电动汽车的充电开始时刻、日行驶里程、每百公里耗电量、蓄

电池容量, 根据概率密度函数进行随机抽样, 求得每辆电动汽车的充电功率曲线, 累计求和可得所有电动汽车 24 h 内的总功率曲线。为减少计算量, 本文仅求取整点时刻的总功率。重复 5 次, 求得总功率曲线的平均值, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 电动汽车的充电总功率在一天内的变化范围较大, 从接近 0 波动到 1 500 kW 以上。

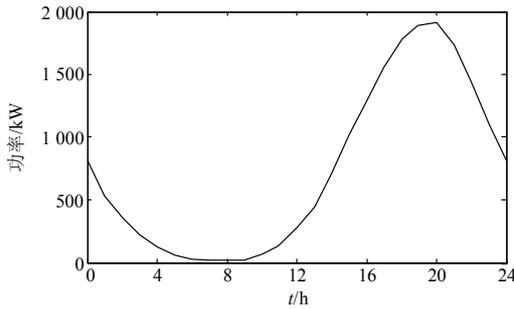


图 3 1 500 辆电动汽车总充电功率曲线

Fig. 3 Charging power curve of total 1500 EVs

2 含电动汽车的配电网保护新方法

目前, 35 kV 及以下配电网主要采用三段式电流保护或距离保护, 其优点是简单可靠, 在一定程度上能够满足快速切除故障的要求。但随着大规模电动汽车的入网充电, 原有的保护受到了一定影响, 保护的可靠性、灵敏度降低, 甚至可能出现误动、拒动的现象。为此, 需要对原保护方案进行改进, 提出新的配电网保护方案。

2.1 大规模电动汽车入网充电的影响

从图 3 中可以看到, 大规模电动汽车入网充电会造成负荷的增加。住宅区域原负荷在 19~21 时处于峰值, 与充电负荷的峰荷相叠加, 造成最大负荷值大幅增加。传统的线路电流保护 III 段(定时限过电流保护)按照躲过线路的最大负荷电流整定, 随着线路最大负荷的增加, III 段整定值也相应增加。但在线路较长的情况下, 相邻线路末端发生短路时短路电流较小, 远后备保护灵敏度不足, 若相邻线路保护拒动, 本保护也可能不动作, 失去后备保护的作用。因此, 仅仅对整定值进行改变是不可行的。所以, 必须考虑一种适合于含大规模电动汽车的后备保护方案。

2.2 基于无功功率突变量启动的电流 III 段保护

电动汽车充电负荷的特性, 其功率因数接近于 1, 无功分量很小; 而线路发生短路时, 故障电流的功率因数角等于线路阻抗角, 无功分量很大。因此, 可以通过无功功率的变化量来判断线路是重载状态

(即含大规模电动汽车)还是短路状态。在正常运行或者大规模汽车集中充电时, 系统的功率因数比较大, 接近于 1, 无功功率都非常小; 而在配电网线路突然发生故障时, 保护安装处测得的功率因数较小, 与线路的阻抗角有关, 无功功率很大。据此, 可以设置一个无功功率变化元件来检测配电网线路是否发生故障。如果无功功率较小, 且几乎没有波动, 则为系统正常运行状态或者大规模电动汽车充电运行状态; 如果无功功率突然变化, 且变化量较大, 则说明可能是故障状态, 此时结合短路电流, 可以构成一种改进的电流保护方案, 保护逻辑框图见图 4。

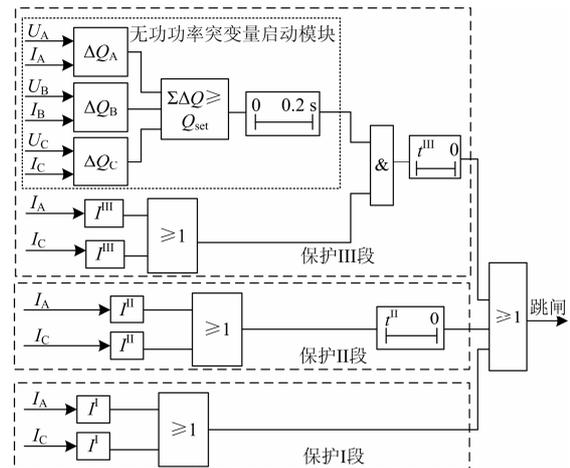


图 4 基于无功功率突变量启动的电流保护逻辑框图

Fig. 4 Logic diagram of current protection based on reactive power fault component

保护 I、II 段动作特性与普通电流保护相同, III 段电流保护增设无功功率突变量启动模块, 当测得三相无功功率突变量之和高于启动值 Q_{set} 时, III 段电流元件也启动的话, 整套保护出口动作。无功功率的检测间隔应根据短路发生至短路稳态的时间来确定, 一般可取为 0.02~0.04 s。当充电汽车大规模充电时, 负荷较重, 虽然电流可能超过 III 段定值, 但由于不存在无功功率突变量, 整套保护不会动作, 可以很好地躲开电动汽车充电带来的负荷波动。

2.3 保护整定方法

由于加入了无功功率的突变量元件, 电流元件的整定值可以做适当的调整。

2.3.1 电流元件整定方法

I、II 保护段定值较高, 不会受到负荷电流的影响, 按照常规方法进行整定。

对于 III 段电流元件, 增设无功功率突变量元件后, 即使负荷较重, 整定值也可以大幅降低, 无须按照躲开包括电动汽车充电功率的最大负荷

电流来整定。充电负荷不会导致无功功率突变量的启动元件的动作, 因此 III 段电流元件可以直接按照远后备保护必须保证的灵敏度来整定 III 段动作电流, 整定方法见方程式(2)。

$$I_{\text{act}}^{\text{III}} = \frac{I_{k.\text{min}}}{K_{\text{sen}}} \quad (2)$$

灵敏系数 K_{sen} 可以适当大一些, 取 1.5~1.8, 这样的话, 电流 III 段元件肯定可以满足远后备的灵敏度要求。随着电流元件的整定值的降低, 保护的抗过渡电阻的能力增强。

2.3.2 无功功率突变量元件整定方法

三相无功突变量启动值 Q_{set} 按照躲开本线路正常运行时可能出现的最大无功功率进行整定, 并且考虑在相邻线路故障时保护动作切除故障后, 电动机自启动过程中可以可靠返回。在这里, 返回系数可以取 0.9。正常运行时, 如果不考虑电动汽车的大规模接入, 配电网的功率因数约为 0.9, 所以, 既然有最大的负荷电流以及电压等级, 无功功率的整定值可以按照方程式(3)来整定。

$$Q_{\text{set}} = K_f \times \frac{K_{\text{rel}}}{K_{\text{re}}} \times 3U_N I_{\text{max}} \sin\varphi_N \quad (3)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数, 可以取 1.2~1.3; K_{re} 为返回系数; φ_N 为正常运行时的功率因数角。 K_f 为故障突变量系数, 正常运行情况下, 负荷波动通常较为平稳, 非故障情况下, 即使电动汽车接入, 无功功率检测间隔内, 无功突变量不会很大, 因此, K_f 可取值为 0.1。

2.3.3 无功功率突变量元件的灵敏度校验

系统示意图如图 5 所示。 Z_S 为系统阻抗, Z_L 为线路阻抗(忽略系统和线路阻抗的电阻分量)。

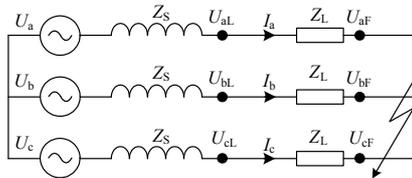


图 5 BC 两相相间短路系统示意图

Fig. 5 System diagram of 2-phase inter-phase short circuit

线路末端发生 BC 两相金属性短路时, 各电压与电流的相量图如图 6 所示。

设相电压为 E , 则 B 相电流为

$$I_b = \frac{\sqrt{3}E}{2(Z_S + Z_L)} \quad (4)$$

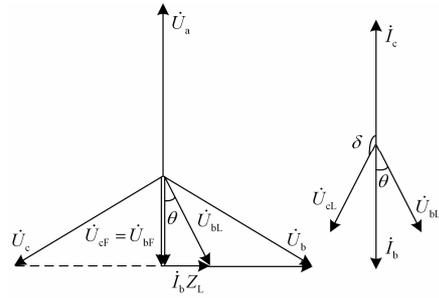


图 6 BC 相电压与电流相量图

Fig. 6 Phasor diagram of B & C phase voltage and current

保护安装处测得的 B 相无功功率为

$$Q_B = U_{bL} I_b \sin\theta = I_b \cdot I_b Z_L = \frac{3E^2 Z_L}{4(Z_S + Z_L)^2} \quad (5)$$

由于配电线路的阻抗角比较大, 可以不计各阻抗的电阻分量, 则 θ 和 δ 互补, C 相无功功率为

$$Q_C = U_{cL} I_c \sin\delta = U_{bL} I_b \sin\theta = Q_B \quad (6)$$

保护安装处测得的总无功功率的突变量为

$$Q_\Sigma = Q_B + Q_C = \frac{3E^2 Z_L}{2(Z_S + Z_L)^2} \quad (7)$$

突变量无功元件灵敏度的表达式为

$$K_{\text{sen}} = \frac{Q_\Sigma}{Q_{\text{set}}} = \frac{U_N^2 Z_L}{2(Z_S + Z_L)^2 Q_{\text{set}}} = \frac{U_N Z_L}{2(Z_S + Z_L)^2 (K_f \times \frac{K_{\text{rel}}}{K_{\text{re}}} I_{\text{max}} \sin\varphi_N)} \quad (8)$$

通常情况下, 由于线路阻抗的电阻分量较小, 短路电流的无功分量较大; 而负荷的有功分量较大, 尤其是电动汽车充电负荷, 无功功率很小。因此, 突变量无功元件的灵敏度很高, 能够准确分辨负荷电流与短路电流, 具体的灵敏度可以见下面的仿真验证。

3 算例验证与仿真

本节以某 10 kV 居民区配电网系统为例进行整定计算, 并仿真验证。系统结构如图 7 所示。

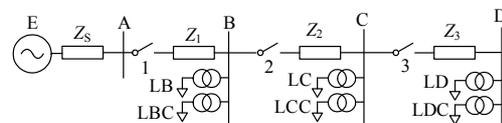


图 7 配电网结构图

Fig. 7 Structure of distribution network

系统参数如下: 等效电源 $E=10.5$ kV, $Z_{s,\text{min}}=j5$ Ω , $Z_{s,\text{max}}=j8$ Ω , 中性点不直接接地。

输电线 AB、BC、CD 长度分别为 15 km, 10 km, 10 km, 型号为 LGJ-95, $Z_1=0.4\Omega/\text{km}$, 阻抗角 57° 。负荷: B、C、D 节点为居民区, 每个居民区拥有 500 辆电动汽车。LB、LC、LD 为功率因数 0.9 的原普通用电负荷, 按照文献[20]的日负荷波动曲线。LBC、LCC、LDC 为电动汽车充电负荷, 功率因数为 0.98, 波动规律按照图 3 的曲线。线路 AB 上计及电动汽车充电的总负荷和未接入电动汽车的总负荷波动曲线如图 8 所示。

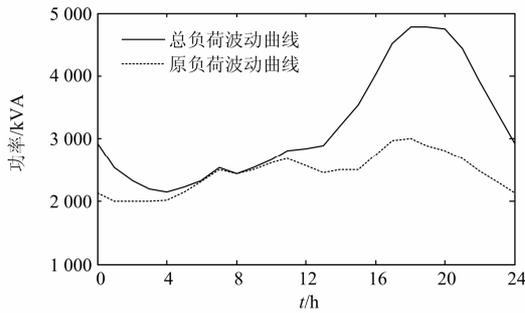


图 8 日负荷曲线
Fig. 8 Daily load curve

线路总负荷与大规模电动汽车未接入充电相比大幅提高, 日负荷峰值出现在每日的 19 时附近。

3.1 整定计算与校验

负荷数据与最小运行方式下 AB、BC 线路末端短路时的短路电流计算结果列于表 1。

表 1 负荷数据与短路电流计算结果

最大负荷 功率/MVA	最大负荷 电流/A	C 点短路时线路 AB 的电流/A	B 点短路时线路 AB 的电流/A
4.78	307.3	304	390.8

根据表 1 中的数据整定校验保护 1。无功功率突变量启动元件按式(3)整定, 按式(8)校验灵敏度, 计算结果列于表 2。

表 2 无功功率突变量启动元件整定值与灵敏度

整定值/Mvar	灵敏度
0.19	8.5

结果表明, 启动元件灵敏度很高, 将短路时开放保护, 如果 III 段电流元件动作, 则保护可以出口动作, 切除故障线路。改进的电流保护 III 段按照式(2)整定短路电流, 校验近后备和远后备保护的灵敏度, 并与传统电流保护 III 段相对比, 结果列于表 3。

表 3 传统保护与改进保护的对比

	protection method		
	电流整 定值/A	远后备保护 灵敏度	近后备保护 灵敏度
传统保护	614.6	0.49(<1.2)	0.64(<1.5)
改进保护	168.9	1.80	2.32

结果表明, 大规模电动汽车入网充电时, 传统电流保护 III 段灵敏度较低, 甚至可能不满足要求。采用改进的电流保护 III 段后, 保护灵敏度提高, 保证了作为后备保护的 III 段在主保护拒动时的准确动作。

3.2 PSCAD 仿真验证

3.2.1 无功功率变化量元件的动作特性

在 PSCAD 中建立图 7 所示的配电网型, 1.0 s 时发生 AB 两相相间短路且保护 2 拒动, 则保护 1 将作为远后备保护动作。假设负荷大小在短路后短时间内保持不变。

最小运行方式下 BC 线路末端发生金属性短路时, 三相无功功率之和在短路前后的波形如图 9 所示。

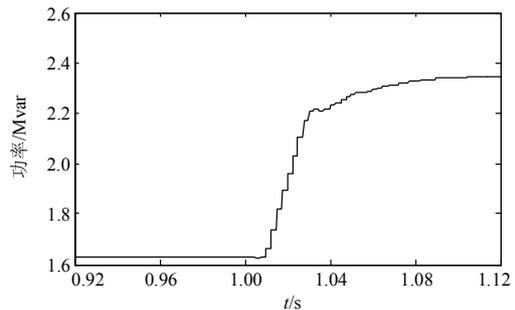


图 9 三相无功功率之和在故障前后的波形
Fig. 9 Waveform of the sum of three-phase reactive power before and after the fault

1.04 s 时基本达到短路稳态。无功功率突变量元件的灵敏度为

$$K_{sen} = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{set}} \approx \frac{2.23 - 1.63}{0.19} = 3.2 \quad (9)$$

灵敏度较大, 突变量元件将开放保护。

3.2.2 不同故障点位置下保护的動作特性

假设发生金属性短路, 短路位置分别设定为 BC 线路的 50%和 100%处。保护 1 测得的短路电流、无功功率突变量与动作情况列于表 4。

仿真结果表明, 故障不同位置时保护均能准确动作。

表 4 不同故障位置下保护 1 的测量值与动作情况
Table 4 Measurements and actions of protection 1 with different fault location

短路方式	无功突变量/Mvar	是否启动	短路电流/A	是否动作
50%位置两相短路	1.57	启动	273.9	动作
50%位置三相短路	3.15	启动	318.0	动作
100%位置两相短路	1.52	启动	269.9	动作
100%位置三相短路	3.06	启动	311.6	动作

3.2.3 保护的抗过渡电阻能力

短路位置分别设定为 BC 线路 50%和 100%处, 相间短路过渡电阻分别设定为 15 Ω 和 30 Ω 。保护 1 测得的短路电流、无功功率突变量与动作情况列于表 5。

表 5 不同过渡电阻下保护 1 的测量值与动作情况
Table 5 Measurements and actions of protection 1 with different transition resistance

短路方式	过渡电阻/ Ω	无功突变量/Mvar	是否启动	短路电流/A	是否动作
50%位置两相短路	15	1.17	启动	237.3	动作
50%位置三相短路	30	0.80	启动	195.5	动作
100%位置两相短路	15	2.66	启动	290.1	动作
100%位置三相短路	30	2.09	启动	257.0	动作
50%位置两相短路	15	1.11	启动	231.0	动作
50%位置三相短路	30	0.74	启动	189.6	动作
100%位置两相短路	15	2.54	启动	283.1	动作
100%位置三相短路	30	1.97	启动	250.0	动作

仿真结果表明, 不同过渡电阻下保护均能动作, 因此保护 1 能够起到后备保护的作用。

3.2.4 计算与仿真结果

计算与仿真结果表明, 短路故障发生于下一级线路时, 基于无功功率突变量启动的电流保护 III 段在下一级线路保护拒动的情况下能够可靠动作, 起到远后备保护的作用, 并且具有较强的抗过渡电阻能力。

4 结论

本文对电动汽车的充电行为进行了建模与仿真, 分析了充电负载的特性, 通过蒙特卡洛方法求得了某住宅区 1500 辆家用电动汽车的充电日负荷曲线。针对充电负荷的负载特性及其对配电网继电保护的影响, 提出了基于无功功率突变量的过电流保护方案, 给出了详细的整定方法及其保护的动

特性, 该保护具有较大的灵敏度, 同时, 动作可靠性高。仿真结果表明, 当存在大规模充电负载时, 如果按照传统的过电流保护进行整定计算, 那么, 保护的灵敏度基本上很难满足要求, 而当采用基于无功功率突变量启动的过电流保护, 可以降低电流保护的整定值, 可以满足灵敏度的要求, 同时, 由于正常运行时的无功功率较小, 故障时的无功功率比较大, 他们的灵敏度也比较大, 所以, 整套保护的灵敏度比较高, 且具有较强的抗过渡电阻能力。

参考文献

- [1] 赵幸福, 王仲范, 邓亚东, 等. 电动汽车蓄电池建模仿真[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2004, 26(1): 151-154.
ZHAO Xingfu, WANG Zhongfan, DENG Yadong, et al. Modeling and simulation of storage battery on electric vehicles[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Engineering, 2004, 26(1): 151-154.
- [2] 李娜, 黄梅. 基于不同整流装置的电动汽车充电机比较[J]. 华北电力技术, 2011(1): 23-29.
LI Na, HUANG Mei. Comparison among chargers of electric vehicle based on different rectifiers[J]. North China Electric Power, 2011(1): 23-29.
- [3] 马玲玲, 张洁琼. 基于 PSCAD 的电动汽车充电装置建模研究及谐波分析[J]. 陕西电力, 2012(2): 28-32.
MA Lingling, ZHANG Jieqiong. Study on electric vehicle charging device model based on PSCAD and harmonic analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2012(2): 28-32.
- [4] 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: 36-42.
HUANG Shaofang. Research on harmonic of electric vehicle charger[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008: 36-42.
- [5] 顾越. 电动汽车充电机及其电气性能测试研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
GU Yue. Study on off-board electric vehicle charger and its electrical performance test[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [6] 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.
- [7] 李瑞生, 王晓雷, 周逢权, 等. 灵巧潮流控制的电动汽

- 车智能化充电站[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 87-90.
- LI Ruisheng, WANG Xiaolei, ZHOU Fengquan, et al. The system of electric vehicle intelligence charge station with smart power flow control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 87-90.
- [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.
- 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.
- [9] 郭伟, 王跃, 王兆安, 等. 应用于电动汽车充电站的PWM整流器控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 153-158.
- GUO Wei, WANG Yue, WANG Zhaoan, et al. Control strategy for PWM rectifier in electrical vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 153-158.
- [10] 黄润, 周鑫, 严正, 等. 计及电动汽车不确定性的有序充电调度策略[J]. 现代电力, 2012, 29(3): 57-62.
- HUANG Run, ZHOU Xin, YAN Zheng, et al. The controlled charging dispatch strategy by considering of the uncertainty of electric vehicles[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(3): 57-62.
- [11] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
- TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [12] 黄润. 电动汽车入网对电网负荷影响的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 14-18.
- HUANG Run. Impacts of electric vehicles charging on the load of power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 14-18.
- [13] 王帆, 包海龙, 徐凡, 等. 电动汽车接入对配电网运行影响的研究与分析[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1089-1092.
- WANG Fan, BAO Hailong, XU Fan, et al. Research and analysis of EV access to distribution network[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1089-1092.
- [14] 郑竞宏, 戴梦婷, 张曼, 等. 住宅区式电动汽车充电站负荷集聚特性及其建模[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 32-37.
- ZHENG Jinghong, DAI Mengting, ZHANG Man, et al. Load cluster characteristic and modeling of EV charge station in residential district[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 32-37.
- [15] 钟童科. 大规模电动汽车的充放电行为及其对电网的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- ZHONG Tongke. A study on charging-discharging behaviors of large-scale electric vehicles and their impact on power grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [16] BRADLEY T, QUINN C. Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(16): 5399-5408.
- [17] 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.
- [18] 杨冰, 王丽芳, 廖承林. 大规模电动汽车充电需求及影响因素[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 22-27.
- YANG Bing, WANG Lifang, LIAO Chenglin. Research on power-charging demand of large-scale electric vehicles and its impacting factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22-27.
- [19] 陈琛, 徐志根, 刘术波. 电动汽车充电站继电保护配置方案的研究[J]. 电气应用, 2012, 31(12): 64-65.
- CHEN Chen, XU Zhigen, LIU Shubo. Research on relay protection scheme of EV charging station[D]. Electrotechnical Application, 2012, 31(12): 64-65.
- [20] 肖建华, 王锐凤, 温春楠, 等. 典型日负荷曲线预测的一种简单方法[J]. 吉林电力, 2006, 34(2): 14-17.
- XIAO Jianhua, WANG Ruifeng, WEN Chunnan, et al. A simple method of typical day load curve forecasting[J]. Jilin Electric Power, 2006, 34(2): 14-17.

收稿日期: 2014-07-16; 修回日期: 2014-11-10

作者简介:

郭煜华(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与微网; E-mail: eatify@126.com

范春菊(1967-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能在继电保护及综合自动化中应用。E-mail: fanchunju@sjtu.edu.cn

(编辑 张爱琴)