

# A Method Solving Dynamic Power Imbalance of Distribution Network Containing Electric Vehicles Access

Rui Wu, Xiaofu Xiong, Tingli Hu, Jinxin Ouyang

State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: 532901639@qq.com

Received: Feb. 6<sup>th</sup>, 2016; accepted: Feb. 26<sup>th</sup>, 2016; published: Feb. 29<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

With the rapid development of electric vehicles in recent years, the random load producing from the electric vehicles access to the distribution network may increase the volatility of electricity and aggravate the power imbalance of the distribution network. When a large number of electric vehicles are being charged at the same time, the random load may exceed the expectation design of the traditional distribution network and distribution transformers need to transfer more power. If using large capacity distribution transformers, it may still be difficult to meet the requirements and increase investment. Whereas, a method solving dynamic power imbalance of distribution network is proposed in this paper. In this solution, DC transmission lines are used to link different distribution transformers, and based on the Three-Phase Voltage Source Converter, which results in a reasonable distribution of the load and mitigates the impact of soaring load of electric vehicle. This paper describes a mathematical model of the load of distribution network containing electric vehicles access, which is simulated by measured data and Monte Carlo simulation method. The effectiveness of the proposed method is verified through the simulation analysis.

## Keywords

Electric Vehicles, Random Load, Distribution Transformer, Power Balance, Converter

---

# 含电动汽车接入的配网动态功率不平衡解决方法

乌睿, 熊小伏, 胡婷立, 欧阳金鑫

输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆  
Email: 532901639@qq.com

收稿日期: 2016年2月6日; 录用日期: 2016年2月26日; 发布日期: 2016年2月29日

## 摘要

随着电动汽车最近几年的快速发展, 电动汽车接入配网产生的随机负载将增加配电变压器输送电能的波动性, 加剧配网的功率不平衡。当大量电动汽车同时充电时可能超出传统配网的设计预期, 配电变压器需要增加比平时更多的额外功率。若更换容量更大的配电变压器, 可能仍难以满足要求, 且增加不必要的投资。因此, 本文提出一种仅需在现有配网结构上进行改进的动态功率平衡方法, 采用三相电压型变流器通过直流线路联络配网中的各配电变压器以实现负载的合理分配和降低电动汽车负载的冲击。通过实测数据和蒙特卡洛模拟分析法建立电动汽车接入配网的负载模型, 仿真分析表明该配网动态功率平衡系统具有较好的实用性。

## 关键词

电动汽车, 随机负载, 配电变压器, 功率平衡, 变流器

## 1. 引言

随着传统能源逐渐枯竭和环境污染等问题日益严重, 电动汽车已成为汽车产业发展的热点之一。我国制定了一系列促进电动汽车发展的政策举措, 包括近期公布的《电动汽车充电基础设施发展指南(2015-2020)》和《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》, 明确继续支持电动汽车、燃料电池汽车发展[1] [2]。然而, 大量电动汽车的接入会给配网带来很大的影响[3] [4], 特别是产生随机性的负载将使得低压配电网的动态功率不平衡问题更加突出。

电动汽车的充电行为可以看成是一种随机且分散的负载, 这与常规负载有较大差异。电动汽车的负载特性受电动汽车充电总体数量、用户使用特性、充电设施的分布等影响[5] [6]。目前, 国内针对电动汽车接入对配网的影响已展开了大量研究, 主要集中于网损分析、电能质量分析、分布式新能源和电动汽车组成的新型智能配电网协调运行与控制、电动汽车负荷建模以及充电桩的优化布置等方面[7]-[10]。文献[11]针对电动汽车接入配网时连续充电、同时充电以及正常分布充电等不同的充电场景, 研究其对配网的负荷平衡带来的影响。文献[12]针对电动汽车接入引起的配网电压不对称水平进行了计算, 一定条件下将引起配网母线电压不对称度超出标准允许范围。进一步考虑各相电动汽车充电的同时性, 文献[13]对公共母线电压不对称度的概率分布进行了仿真计算。文献[14]阐述了电动汽车接入时产生谐波问题的机理, 并指出谐波污染会给配网造成一系列的危害, 最后提出采用一种新型的充电设备能有效减少谐波污染问题。

上述研究虽然已经做了相当多的工作，但对于电动汽车接入配电网带来的负载冲击及功率不平衡问题的解决方法及策略鲜有论及。文献[15]建立了分布式新能源和电动汽车组成的协调调度模型，利用新能源输出功率的可调性来解决电动汽车充电负载造成的配网功率不平衡问题。但是需要对现有配网进行全面改造，这样会带来一定运行成本。

本文以配网的整体动态功率平衡为目标，提出了含有电动汽车接入的配电网动态功率平衡方案。采用直流线路联络各配电变压器，通过三相电压型变流器控制配电变压器间交换的功率，实现配网间负载的合理分配和降低电动汽车随机负载的冲击，能够较好地解决配电网动态功率不平衡问题。此外本方案仅在现有配电网结构和配置的基础上进行适当调整就能够有效地实现，且无需增加大量的实时监测点，具有安全和经济的特点，可在一定程度上提高配网的供电质量和系统运行的可靠性。

## 2. 电动汽车接入配网的负载建模

随着电动汽车的增加，充电站的数量也会逐渐增多。电动汽车的充电行为在时间和空间上都具有不确定性，这将会对配电变压器等设备带来不可忽略的影响。因此必须研究电动汽车充电时的功率特性，建立负载模型以更好地分析电动汽车大量接入时对配网的影响。目前电动汽车负载建模方法可以分为基于出行需求计算方法、充电站充电负载概率法和蒙特卡洛模拟分析法[16]。考虑电动汽车充电的随机性，因此一般采用不同随机分布重复的原理进行拟合。

根据文献[17]中实际测量的充电站运行数据，本文采用蒙特卡洛模拟分析法求出 24 小时内该电动汽车充电站接入的负载比例接近正态分布，其拟合概率密度函数为：

$$f(t) = \frac{1}{2} e^{-\frac{(t-6)^2}{8}} + e^{-\frac{(t-18)^2}{18}} + e^{-\frac{(t+6)^2}{18}} \quad t \in [0, 24] \quad (1)$$

若电动汽车充电站容量为  $P_x$ ，其接入配网日负载曲线函数应为：

$$P_x(t) = P_x \times f(t) \quad t \in [0, 24] \quad (2)$$

根据拟合得到的负载曲线函数，分别选取 60 kw、150 kw 和 200 kw 不同容量的电动汽车充电站，通过仿真得到其充电负载曲线如图 1 所示。

从图 1 中可以发现，电动汽车充电负载在一天中存在两个高峰期，分别是中午和晚上，部分用户利用中午时间进行充电，而大部分用户利用夜间闲置时间将电动汽车充满电，所以其夜间充电的比例可以接近充电站的额定功率。同时可以看出，随着充电站等级的升高，接入配网产生的负载影响也越来越明显。因此，本文建立的负载模型比较符合电动汽车的随机性。

## 3. 配网动态功率平衡系统结构及运行分析

动态功率平衡系统结构如图 2 所示。其主要采用三相电压型变流器(Voltage Source converter-VSC)通过直流线路联络配网中的各配电变压器。 $n$  台配电变压器对应  $n$  台 VSC； $P_{e1}, P_{e2}, \dots, P_{en}$  表示  $n$  台配电变压器向用户输出的有功功率； $P_{x1}, P_{x2}, \dots, P_{xm}$  表示各用户小区中电动汽车的负荷或充电站容量； $P_{y1}, P_{y2}, \dots, P_{ym}$  表示各用户小区的常规负荷； $P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gn}$  表示  $n$  台变流器向交流侧电网输出的有功功率。

三相电压型变流器与配电变压器低压侧母线通过联络开关相连。为了稳定联络线直流侧电压，减小功率开关桥路的冲击，每台变流器直流侧安装有稳压电容。

变流器通过控制向交流侧电网输出的有功和无功功率参考值对含电动汽车接入的配电网功率供需进行动态调节。配网动态功率平衡系统包括两种工作状态：

- 1) 在正常运行情况下，变流器与配电变压器低压侧母线连接处于长期工作状态。当某用户小区存在

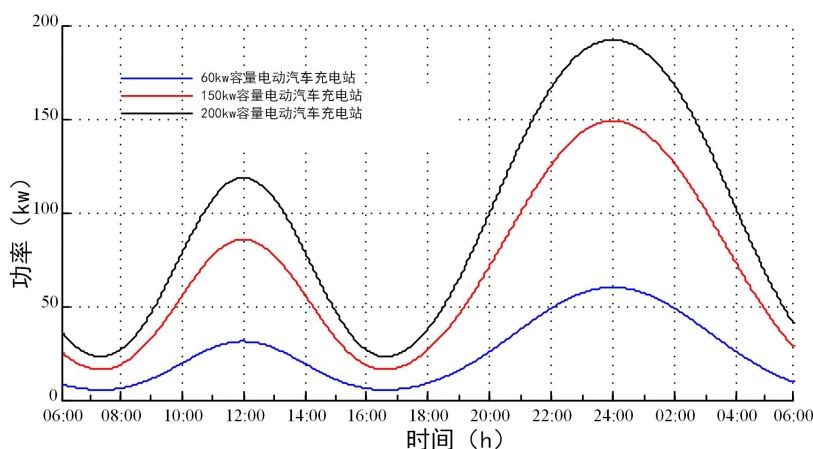


Figure 1. Electric vehicle charging station load curve  
图 1. 电动汽车充电站负载曲线

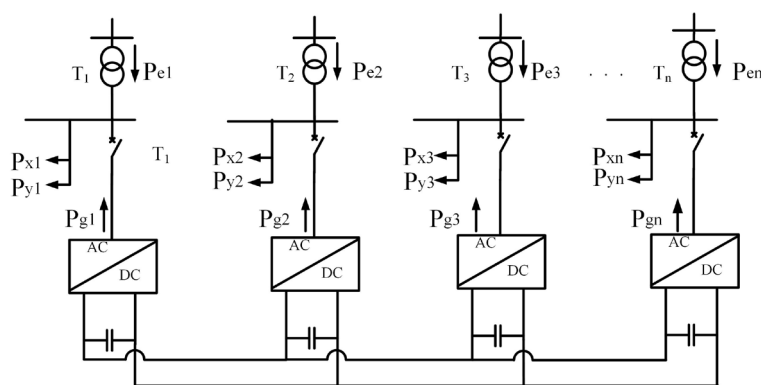


Figure 2. Configuration of the dynamic power balancing system  
图 2. 动态功率平衡系统结构

大容量电动汽车充电时，对应的供电配电变压器可能处于过载运行，变流器自动调节输出的有功功率，缓解变压器供电容量的不足；当某配电变压器处于轻负载运行时，对应的变流器调节输出的有功功率为负值，将多余的有功功率通过变流器输送至其余用户小区，实现动态功率平衡，避免配电变压器处于轻或重负载运行。

2) 当用户小区发生故障时，流过对应的配电变压器电流将急剧升高。此时为避免损坏变流器和增加配网的短路容量，断开联络开关同时对应的变流器处于闭锁状态。当配网发生严重故障时，应将功率平衡系统退出即全部断开联络开关

#### 4. 配网动态功率平衡系统控制策略

配网动态功率平衡系统采用功率解耦控制方法对三相电压型变流器的输出功率进行直接控制。由于变流器输出的有功功率并非相互独立，为了稳定直流侧电压，至少有一台变流器采用电压、电流双闭环控制方法。而为了避免变流器输出功率的不确定性，采用电压、电流双闭环控制的变流器应始终保持为一个。

##### 4.1. 变流器功率解耦控制

三相电压型变流器的基本电路如图 3 所示。其中， $L$  为滤波电感； $R$  为变流器交流侧等值电阻； $C_{dc}$

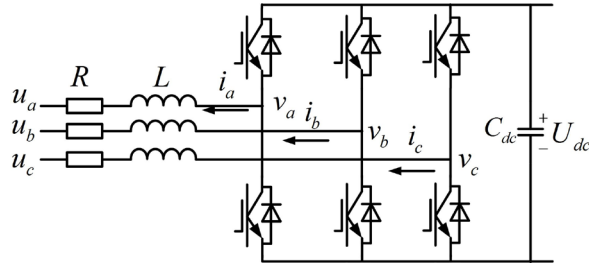


Figure 3. Basic structure of three-phase voltage source converter  
图 3. 三相电压型变流器基本电路结构

为直流侧的稳压电容； $U_{dc}$  为直流侧电压； $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为电网三相电压； $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$  为变流器交流侧三相电压； $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为变流器流向电网三相电流。

在  $dq$  同步旋转坐标系下变流器的交流侧电压可以表示为：

$$\begin{cases} v_d = u_d + L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q \\ v_q = u_q + L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\omega$  为电网频率， $v_d$ 、 $v_q$  分别为变流器交流侧电压  $d$  轴分量和  $q$  轴分量， $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$  分别为电网电压的  $d$  轴分量、 $q$  轴分量以及变流器流向电网的电流  $d$  轴分量和  $q$  轴分量。

由式(9)可知，电流交叉耦合项  $\omega Li_d$ 、 $\omega Li_q$ ，以及电网电压  $u_d$ 、 $u_q$  的存在使得电流  $dq$  轴分量相互影响。引入前馈补偿项以实现变流器  $d$ 、 $q$  轴电流的解耦控制。

采用  $d$  轴电网电压矢量定向，即  $u_d = u_m$ 、 $u_q = 0$ ， $u_m$  表示网侧电压空间矢量，则变流器电流内环控制器的控制方程为：

$$\begin{cases} v_d^* = k_{gp} (i_d^* - i_d) + k_{gi} \int (i_d^* - i_d) dt + u_d - \omega Li_q \\ v_q^* = k_{gp} (i_q^* - i_q) + k_{gi} \int (i_q^* - i_q) dt + u_q + \omega Li_d \end{cases} \quad (4)$$

式中：上标\*的参数表示控制的参考值。 $k_{gp}$ 、 $k_{gi}$  分别为电流内环控制器的比例积分系数， $v_d^*$ 、 $v_q^*$  分别为变流器交流侧电压  $d$ 、 $q$  轴分量参考值， $i_d^*$ 、 $i_q^*$  分别为变流器电流  $d$ 、 $q$  轴分量参考值， $u_d - \omega Li_q$  及  $u_q + \omega Li_d$  为引入的前馈补偿项。

在  $dq$  同步旋转坐标系下变流器交流侧有功功率和无功功率可表示为：

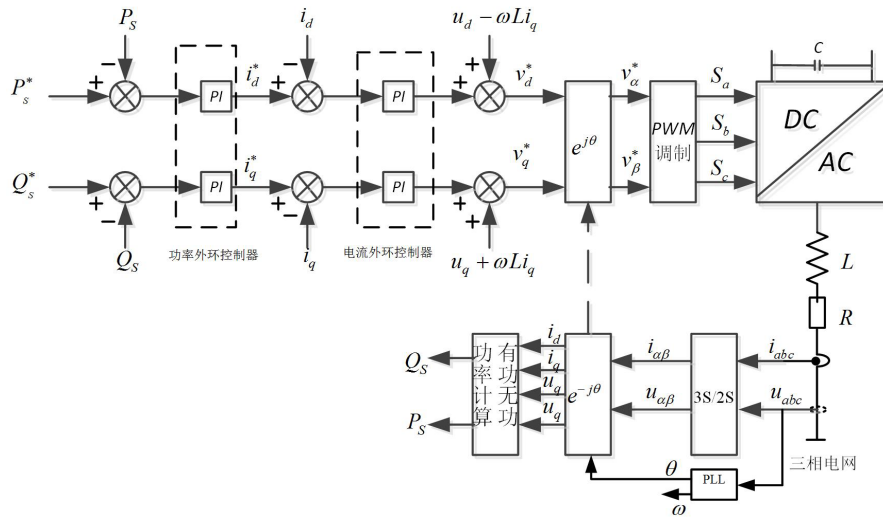
$$P = \frac{3}{2} u_d i_d, \quad Q = -\frac{3}{2} u_d i_q \quad (5)$$

由式(3)可知，通过调节变流器  $d$  轴和  $q$  轴电流可以分别实现变流器输出有功和无功功率的控制，因此可以根据不同目标设定功率参考值，通过功率外环控制器确定电流内环控制器的电流参考值。则变流器功率外环控制器的控制方程为：

$$\begin{cases} i_d^* = k_{lp} (P^* - P) + k_{li} \int (P^* - P) dt \\ i_q^* = k_{lp} (Q^* - Q) + k_{li} \int (Q^* - Q) dt \end{cases} \quad (6)$$

式中： $k_{lp}$ 、 $k_{li}$  分别为功率外环控制器的比例积分系数， $P^*$ 、 $Q^*$  分别为变流器有功功率和无功功率参考值。

以上分析可得三相电压型变流器的功率解耦控制框图，如图 4 所示。根据设定的变流器有功和无功



**Figure 4. Converter power decoupling control block diagram**  
**图 4. 变流器功率解耦控制框图**

功率参考值，经过功率外环控制器及电流内环控制器确定变流器交流电压参考值  $v_d^*$ 、 $v_q^*$ ，将电压参考值作为变流器交流侧  $d$  轴和  $q$  轴电压的调制信号，经过坐标系变换后，由 PWM 调制器产生控制三相桥电路的脉冲，从而实现功率解耦控制。

#### 4.2. 变流器电压、电流双闭环控制

直流侧线路中，当输入有功功率大于输出有功功率时，多余的功率会使直流侧电容电压升高，而反之则降低。不计谐波分量和变流器功率损耗，则直流侧电压与交流侧电压、电流的关系为：

$$C_{dc}U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{3}{2}u_d i_d - \frac{3}{2}u_q i_q \quad (7)$$

同样采用  $d$  轴电网电压矢量定向，直流侧电压仅与电流  $i_d$  相关。因此，通过调节  $i_d$  可控制直流侧电压。则变流器电压外环控制器的控制方程为：

$$i_d^* = k_{vp} (U_{dc}^* - U_{dc}) + k_{vi} \int (U_{dc}^* - U_{dc}) dt \quad (8)$$

式中： $k_{vp}$ 、 $k_{vi}$  分别为电压外环控制器的比例积分系数， $U_{dc}^*$  为直流侧电压参考值。直流侧电压参考值一般设置为额定的直流电压，同时为了避免超调制，直流侧电压不应低于交流侧电压峰值的 2 倍。

根据直流电压和无功功率参考值确定电流  $d$ 、 $q$  轴分量参考值后，可采用与功率解耦控制策略一致的电流内环控制器确定变流器交流电压参考值  $v_d^*$ 、 $v_q^*$ ，并以此作为调制信号，经由 PWM 调制器产生控制三相桥电路的脉冲。

#### 4.3. 两种控制策略的切换

如果配网动态功率平衡系统中用于稳定直流侧电压的变流器由于故障或其他原因而退出运行时，则应在剩余的变流器中选定一个作为备用的稳定直流侧电压变流器，将该变流器的控制策略由功率解耦控制切换到电压电流闭环控制。其切换思想如图 5 所示。

### 5. 配网动态功率平衡系统控制目标

配网动态功率平衡系统以均衡各个配电变压器间的有功功率和调节无功功率作为三相电压型变流器

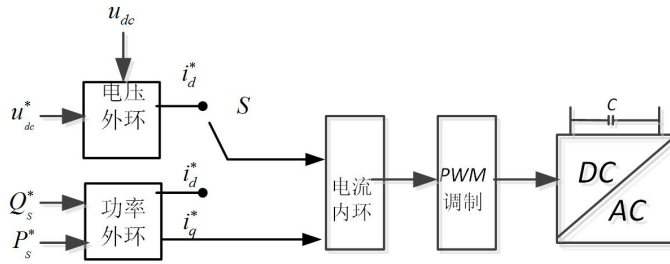


Figure 5. Changing of converter control strategy  
图 5. 变流器控制策略切换

的控制目标。稳态运行情况下，变流器输出无功功率参考值为 0，以实现单位功率运行。因此重点讨论有功功率参考值的设置。

电动汽车接入的配网造成配电变压器负载随机性比较大，不易采用实时计算动态功率来确定变流器有功功率参考值，同时监测点过多也会造成成本问题。

将配网动态功率平衡系统所联接的配电变压器台区的总负载按照每台配电变压器容量进行分配，即保证第  $i$  台配电变压器输出功率为：

$$P_{ei}^* = \frac{S_i}{S_o} \sum_{i=1}^n (P_{xi} + P_{yi}) \quad (9)$$

式中， $S_i$  为台区第  $i$  台配电变压器的容量； $\sum_{i=1}^n (P_{xi} + P_{yi})$  为  $n$  台配电变压器对应的总负载； $S_o = \sum_{i=1}^n S_i$  为  $n$  台配电变压器的总容量。

在配网动态功率平衡系统提供动态功率平衡运行下，第  $i$  台配电变压器及变流器输出的有功功率为：

$$P_{gi}^* + P_{ei}^* = P_{xi} + P_{yi} \quad (10)$$

将(9)代入(10)可得：

$$P_{gi}^* = (P_{xi} + P_{yi}) - \frac{S_i}{S_o} \sum_{i=1}^n (P_{xi} + P_{yi}) \quad (11)$$

在系统正常运行的情况下，动态功率始终满足：

$$P_{gi} + P_{ei} = P_{xi} + P_{yi} \quad (12)$$

并考虑到  $\sum_{i=1}^n P_{gi} = 0$  (不计变流器等损耗)，所以

$$\sum_{i=1}^n P_{ei} = \sum_{i=1}^n (P_{xi} + P_{yi}) \quad (13)$$

将式(12)和(13)代入式(10)可得，第  $i$  台配电变压器对应的变流器输出有功功率参考值为：

$$P_{gi}^* = P_{gi} + P_{ei} - \frac{S_i}{S_o} \sum_{i=1}^n P_{ei} \quad (14)$$

因此系统仅需监测每台配电变压器及对应变流器输出的有功功率即可确定该变流器输出有功功率的参考值。

当用户小区出现冲击性负荷时，变流器有功功率参考值可能大于最大允许输出功率，为了保护变流器和直流侧系统，三相电压型变流器的控制目标应满足以下约束：

$$P_{gi}^* = \begin{cases} -P_{g \max-i} & P_{gi}^* < -P_{g \max-i} \\ P_{gi} + P_{ei} - \frac{S_i}{S_o} \sum_{i=1}^n P_{ei} & |P_{gi}^*| \leq P_{g \max-i} \\ P_{g \max-i} & P_{gi}^* > P_{g \max-i} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $P_{g \max-i}$  为第  $i$  台变流器最大允许输出功率。

## 6. 仿真分析

为验证系统的可行性, 在 PSCAD 仿真平台上搭建了含电动汽车接入的配网动态功率平衡系统仿真模型如图 6 所示, 仿真基本参数如下。  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  配电变压器: 额定变比均为 10.5/0.4, 额定功率分别为 500、800 和 250 kVA。各用户小区的  $P_y$  常规负荷额定功率如表 1 所示。接入配网的电动汽车充电站  $P_{x1}$ 、 $P_{x2}$  和  $P_{x3}$  容量分别为: 60、150 和 200 KW。

配网动态功率平衡系统直流线路额定直流电压为 800 V,  $T_2$  配电变压器对应的变流器采用电压、电流双闭环控制策略, 其余两台变流器采用功率解耦控制。仿真周期以 24 s 模拟一天 24 小时内各用户小区的电动汽车负荷及常规负荷的变化。在配网动态功率平衡系统正常运行下, 讨论以下两种情况以检验系统运行的效果:

a) 常规负荷及电动汽车充电站  $P_{x1}$ 、 $P_{x2}$  和  $P_{x3}$  均并网运行。

b) 仅电动汽车充电站  $P_{x1}$  使用, 在 8 s 时常规负荷  $P_{y22}$  退出同时  $P_{y32}$  投入配网, 而在 12 s 时常规负荷  $P_{y22}$  再投入同时  $P_{y32}$  退出配网。

1) 若不采用配网动态功率平衡系统时, 图 7 为 3 台配电变压器分别在 a 和 b 两种情况下的输出有功功率变化曲线。

在 a 情况下, 配电变压器的输出有功功率变化仅与电动汽车充电负载变化规律有关。由图 7(a) 可知, 3 台变压器的负载分配严重不均,  $T_3$  配电变压器负载甚至大于大容量  $T_1$  配电变压器的负载, 且在 20 s 至 25 s 内出现过载行为。这不仅增加配网损耗和降低供电可靠性, 还会为电网运行安全性带来隐患。当接入配网的电动汽车充电站  $P_{x3}$  容量随着电动汽车数量增加继续扩容时,  $T_3$  配电变压器需要增加比现有更多的额外功率传送, 若更换容量更大的配电变压器也可能难以满足要求。

在 b 情况下, 变压器的输出功率变化与电动汽车充电负载及常规负荷的变化规律有关。不同配电变压器的负载变化是互不直接相关的, 变压器需要承担供电区域内的负载波动。由图 7(b) 可知,  $T_1$  配电变压器负载甚至大于大容量  $T_2$  配电变压器的负载, 易引起配变  $T_1$  的过载。

2) 采用动态功率平衡系统时, 图 8 和图 9 分别为两种情况下 3 台配电变压器的输出有功功率变化曲线和 3 台变流器的输出有功功率曲线。

在 a 情况下, 比较图 7(a) 和图 8(a) 可以发现, 当电动汽车充电站  $P_{x3}$  负载不断增加时, 在动态功率平衡系统的作用下增加的负载按照一定比例分配到各个配电变压器, 避免该部分负载全部由  $T_3$  配电变压器承担, 因此  $T_3$  配电变压器并不会出现过载的现象。图 9(a) 变流器在控制作用下向交流电网输出功率, 其有功功率为正值且随电动汽车充电站  $P_{x3}$  负载的变化曲线而变化。仿真结果与预期控制目标相符。

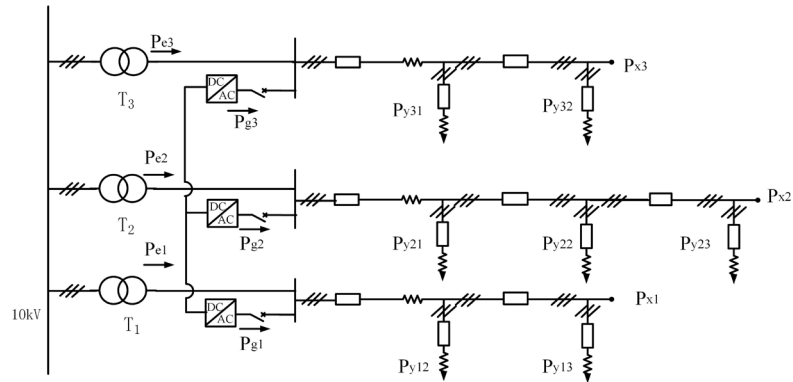
在 b 情况下, 图 7(b) 和图 8(b) 可以发现,  $T_1$  配电变压器不会出现过载。由于各配电变压器通过直流线路相互连接, 不同变压器在同一时刻负载的增减可以实现均衡, 且各配电变压器的负载比值与其相应配电变压器的容量比值一致。仿真结果与预期控制目标相符。

图 10 所示为两种情况下的联络线直流侧电压。尽管在电动汽车充电负载和常规负荷功率变化瞬间, 直流电压由于瞬时功率不平衡而出现一定的波动, 但是在  $T_2$  配电变压器对应的变流器采用电压、电流双闭环控制作用下, 直流电压能够迅速稳定, 保证了动态功率平衡的效果。



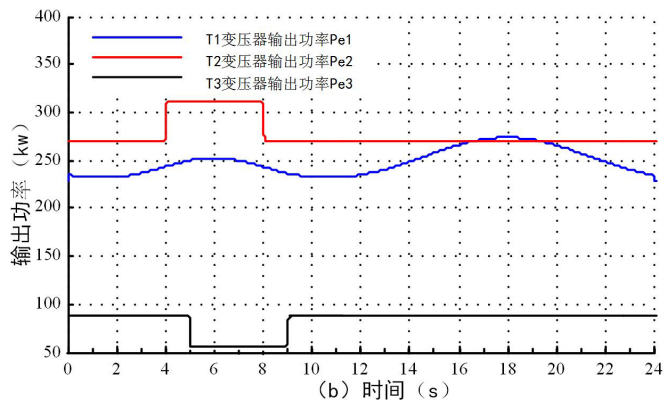
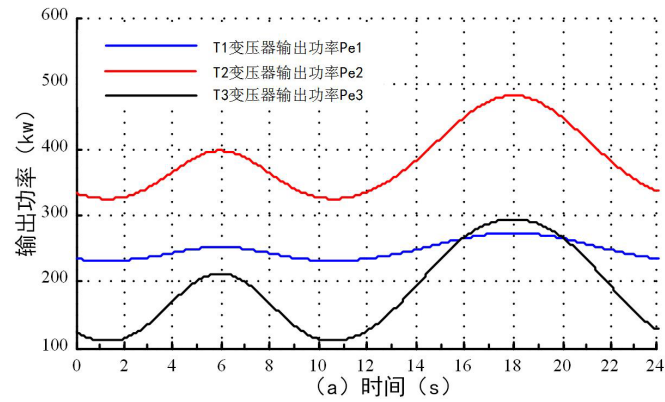
**Table 1.** Loads in the simulation system  
**表 1.** 常规负荷额定功率

负荷	额定功率	负荷	额定功率	负荷	额定功率
$P_{y11}$	115 kw	$P_{y21}$	160 kw	$P_{y31}$	50 kw
$P_{y12}$	70 kw	$P_{y22}$	40 kw	$P_{y32}$	30 kw
$P_{y13}$	30 kw	$P_{y23}$	100 kw		



**Figure 6.** Simulation system of a power balancing method of distribution network

**图 6.** 含电动汽车接入的配网功率平衡系统仿真模型



**Figure 7.** Power flows of transformers without dynamic power balancing system

**图 7.** 无动态功率平衡系统时配电变压器功率

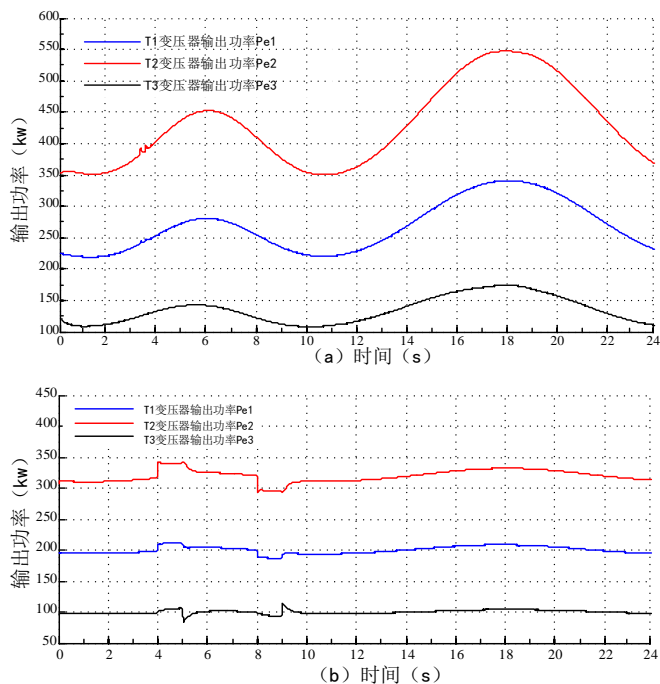


Figure 8. Power flows of transformers when dynamic power balancing system is used

图 8. 采用动态功率平衡系统时配电变压器输出功率

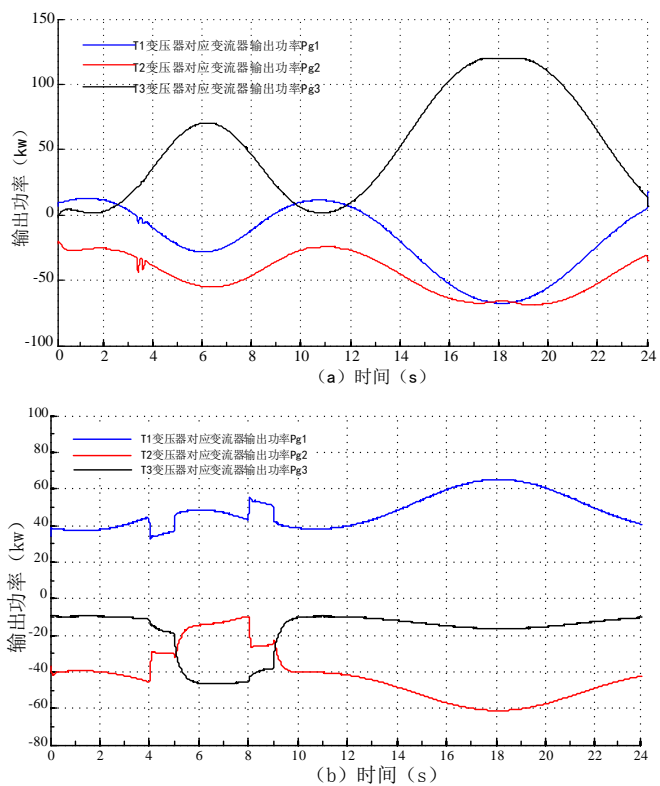


Figure 9. Output active powers of converters when dynamic power balancing system is used

图 9. 变流器输出功率

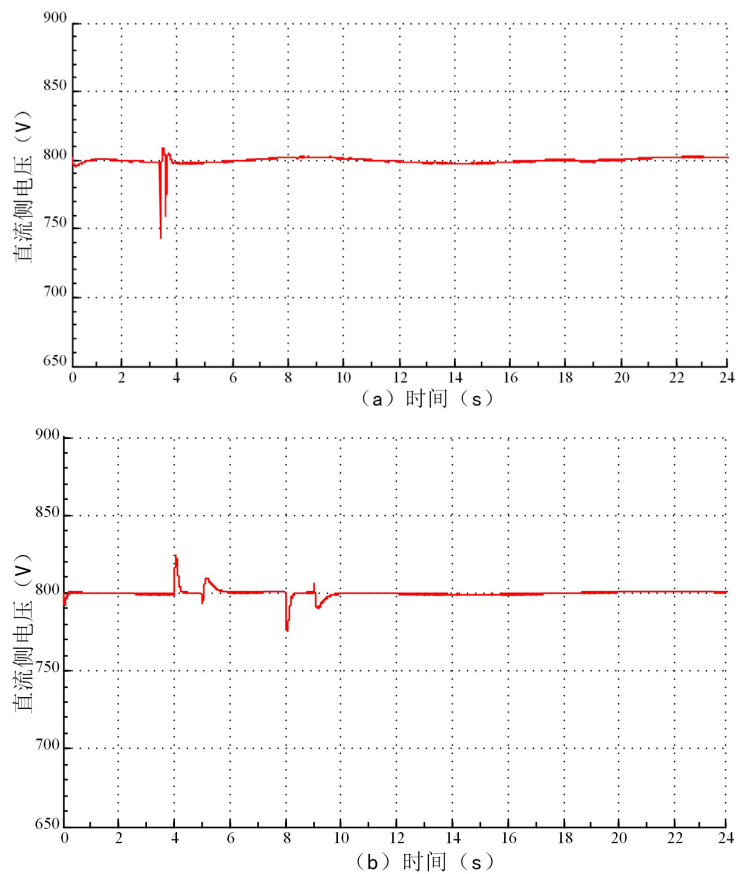


Figure 10. Voltage of DC tie line  
图 10. 联络线直流侧电压

上述仿真表明，无论对于电动汽车充电负载的随机性变化还是常规负荷的投切，通过动态功率平衡系统均能够实现功率变化的合理分配。在采用功率平衡系统后，配电变压器输出的功率按照变压器容量进行分配，实现了含电动汽车接入的配电网在不同配电变压器之间进行负荷平衡的目标，避免了配网动态功率不平衡带来的运行困难问题。此外，动态功率平衡系统将负荷变化量分配至多个变压器供电区域，可以有效减少负荷大幅变化对低压配网的冲击。

## 7. 结论

随着大量电动汽车的使用，电动汽车接入配电网产生的随机性负载加剧了配电网的功率不平衡问题，对配电网的运行造成了较大困难。然而我国配电网规模庞大，为解决当前出现的问题，短期内进行重新规划布局不具有可行性。本文提出一种采用三相电压型变流器联络各配电变压器的配网动态功率平衡方法，能够较好的解决含电动汽车接入的配电网动态功率不平衡和配电变压器过载等问题，具有结构简单、易于实现、运行维护容易等优点。其主要功能包括：

- 1) 实现配电变压器负载的合理分配，避免变压器容量不足，提高供电可靠性；
- 2) 降低电动汽车接入配电网产生的大幅波动对单个配电变压器运行的影响，提高供电质量。

本方案可以在现有配电网结构和配置的基础上进行适当调整就能够有效实现电动汽车充电桩接入配电网带来的冲击，这相对于大规模改造电网具有非常可观的经济性。可以为解决电动汽车接入配电网后的系列问题提供借鉴。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(51407017)。

## 参考文献 (References)

- [1] Duvall, M., Knipping, E., Alexander, M., *et al.* (2007) Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles. Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions. Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1015325.
- [2] 范玉宏, 张维, 陈洋. 国外电动汽车发展分析及对我国的启示[J]. 华中电力, 2010, 23(6): 8-12.
- [3] Rowand, M. (2009) The Electricity Utility-Business Case. *Plug-In Conference*, San Jose, EPRI, Silicon Valley Leadership Group.
- [4] Hubner, M., Zhao, L., Mirbach, T., *et al.* (2009) Impact of Large-Scale Electric Vehicle Application on the Power Supply. *IEEE Electrical Power and Energy Conference*, Montreal, 22-23 October 2009, 1-6.  
<http://dx.doi.org/10.1109/epec.2009.5420866>
- [5] Adornato, B., Patil, R. and Filipi, Z. (2009) Characterizing Naturalistic Driving Patterns for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Analysis. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Michigan, 7-10 September 2009, 655-660.
- [6] Qlan, K.J., Zhou, C.K., Allan, M., *et al.* (2011) Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, **26**, 802-810. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2057456>
- [7] 万路路, 王磊, 丁昊. 配电网电动汽车优化充电研究[J]. 华东电力, 2011, 39(12): 2049-2053.
- [8] 李惠玲, 白晓民, 谭闻. 电动汽车与分布式发电入网的协调控制研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2108-2115.
- [9] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化, 2011, 34(20): 22-29.
- [10] Clement, K., Haesen, E. and Driesen, J. (2010) The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, **25**, 371-380.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036481>
- [11] Jason, W. and Lincoln, P. (2009) Impact of Plug-Hybrid Electric Vehicles on California's Electricity Grid. Duke University, Durham.
- [12] Putrus, G.A., Suwanapingkarl, P., Johnston, P., *et al.* (2009) Impact of Electric Vehicles on Power Distribution Networks. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, 7-10 September 2009, 827-831.  
<http://dx.doi.org/10.1109/vppc.2009.5289760>
- [13] Balmer, M. (2007) Travel Demand Modeling for Multi-Agent Traffic Simulations: Algorithms And Systems. ETH Zürich, Zürich.
- [14] 李俄收, 吴文民. 电动汽车蓄电池充电对电力系统的影响及对策[J]. 华东电力, 2010, 38(1): 109-113.
- [15] 于大洋, 宋曙光, 张波, 等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 24-29.
- [16] De Nigris, M., Gianinoni, I., Grillo, S., Grillo, S., Mssucco, S. and Silvestro, F. (2010) Impact Evaluation of Plug-in Electric Vehicles on Electric Distribution Networks. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, No. 3, 1-6.
- [17] 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.