

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.02.022

通过电动汽车换电站提高电力系统 暂态稳定性的研究

甄浩庆¹, 王建全^{1*}, 杨朝阳², 徐国钧², 韩永强², 徐慧平², 姚海燕²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力公司余杭供电局, 浙江 杭州 311100)

摘要: 针对电动汽车换电站大规模接入电网可能将对系统的优化运行产生较大影响的问题,提出了一种换电站的暂态数学模型,就换电站对电力系统暂态稳定的影响进行了研究。考虑简单的模型,分析了通过控制换电站和电网之间的交换功率提高系统的暂态稳定;然后借鉴电力系统储能元件控制方法,利用电力系统综合分析软件(PSASP)的用户自定义模型UD,对换电站的功率交换进行了建模。以新英格兰系统为例进行了仿真计算。研究表明,该模型验证了换电站在改善电力系统暂态稳定性方面的效果;同时不同接入位置的仿真结果对换电站的选址也有一定的指导意义。

关键词: 电动汽车; 换电站; 暂态稳定; 自定义建模

中图分类号: TM74 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)02-0229-05

Improving power system transient stability by battery swapping station

ZHEN Hao-qing¹, WANG Jian-quan¹, YANG Chao-yang², XV Guo-jun²,
HAN Yong-qiang², XV Hui-ping², YAO Hai-yan²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Yuhang Power Supply Bureau of Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 311100, China)

Abstract: Aiming at the problems of extensive impacts brought by large-scale integration of battery swapping station (BSS) into power system on power system operation, a transient model of BSS was proposed to study on its impact on power system transient stability. The simple model was considered and through the theory analysis, it was drawn the conclusion that power system transient stability can be improved by controlling the output of BSS. Then by referencing to the methods used in controlling other power system energy storage components, a power exchange model on BSS was built by user-defined modules in power system analysis software package (PSASP). Simulations and calculations were carried out with the New England system as an example. The results indicate that the effect of BSS in improving power system transient stability is verified through the model, and the comparative analysis on the effects of BSS installed in different sites which is available for reference is given.

Key words: electric vehicles (EVs); battery swapping station (BSS); transient stability; user-defined module

0 引 言

为缓解传统能源带来的环境污染、全球变暖问题,大力发展新能源迫在眉睫。电动汽车(EVs)因其

环保、能源利用率高等特点而受到青睐,支持电动汽车发展的相关技术研究已成为研究智能电网理论的重要组成部分^[1]。

当前,电动汽车的能量供应可分为充电模式和更换电池两种模式,其中充电模式需要的时间较长,不

收稿日期: 2013-09-09

作者简介: 甄浩庆(1989-),男,河南信阳人,主要从事电力系统稳定与控制方面的研究. E-mail:657073220@qq.com

通信联系人: 王建全,男,博士后,副教授. E-mail:wangjq@zju.edu.cn

能满足人们对生活便利性的追求。以换电模式运营的动力电池换电站(battery swapping station, BSS)则可以在几分钟内完成电池的更换,大大提高了电动汽车使用的便捷性^[2];同时通过对电池进行集中的充电管理可以减轻电动汽车入网随机充电对电力系统的影响^[3-5],实现与光伏、风能这些分布式发电的协调运行。

文献[6]提出了一种基于微电网的电动汽车换电站运营模式,并将其与传统储能电站进行对比,其结果表明,BSS也可以发挥削峰填谷的作用,且更具经济性。文献[7]对电动汽车充电设施接入电网方案进行研究,重点考虑电动汽车的反向放电能力。文献[8]在光伏发电最大功率跟踪和并网逆变控制的基础上,通过加入蓄电池储能系统,实现对发电功率削峰填谷、平抑的功能。文献[9]研究了超导储能装置改善电力系统暂态稳定性、抑制系统振荡的作用。文献[10]建立了基于等效电路的电池储能系统,采用电池储能系统对并网风电场的电能质量和稳定性问题进行仿真,达到了改善电能质量和稳定性的问题。类似地,具备V2G(vehicle to grid)功能的BSS与不间断电源和应急电源非常相似,具备一定的应急供电能力。另外,电池从充电状态切换至V2G模式,是电磁过程,不含机械过程,时间常数很小,因此在系统出现故障时,其可以迅速调整BSS的充、放电功率,提高系统的暂态稳定性。

针对具有V2G功能的BSS,本研究从理论上分析BSS在提高系统暂态稳定方面的作用,进而在PSASP平台上建立BSS的仿真模型,最后,在新英格兰系统上进行仿真研究,以验证BSS在改善电力系统暂态稳定性、抑制系统振荡方面的效果。

1 BSS对系统暂态稳定性影响分析

1.1 含BSS的单机无穷大系统

含有BSS的单机无穷大系统如图1所示,BSS相当于直接接入变电站或者紧邻变电站,这样BSS与电源的电气距离很短,电压偏移等比较小,容纳的最大充电容量也比较大^[7]。在忽略电阻的情况下,功率平衡方程为:

$$P_c = P_0 + P_{BSS} \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{U_2 U_s \sin \delta}{X} \quad (2)$$

式中: P_c —发电机输出功率; P_0 —经由传输线送出的功率; P_{BSS} —BSS与系统之间的交换功率,正值表示BSS对外显示充电状态,负值则表示为放电状态; U_2 , U_s —图中两母线电压; δ —它们之间的夹角; X —它

们之间的联系电抗。

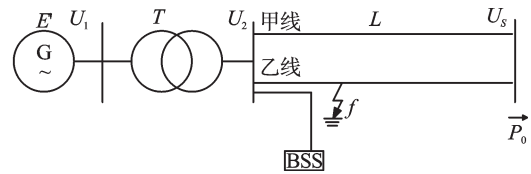
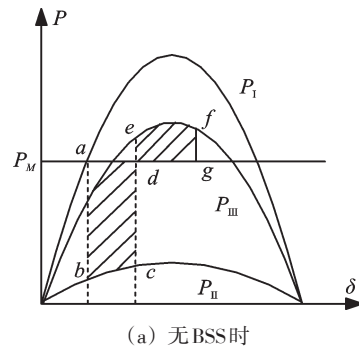


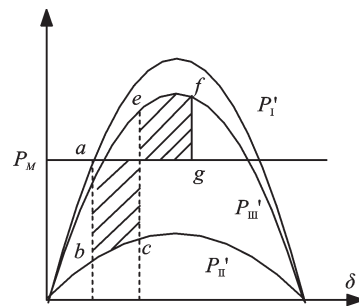
图1 含BSS的单机无穷大系统

一方面,如果是图1左侧机组停电,则 $P_c = 0$,此时为保证 P_0 变化不大,则 $P_{BSS} < 0$,即BSS充当备用电源,为原先机组下面的负荷提供电能,使得恢复供电的时间得以减少。同时也降低了额外配置备用电源的费用。

另一方面,如果是图1乙线发生三相短路故障,故障期间与断路器动作后,由于图1中 U_2 、 U_s 之间联系阻抗 X 的增大,使得 P_0 降低很多,为防止 P_c 变化太大甚至导致失稳出现,则需增加 P_{BSS} ,即安排更多的电池组充电,发电机和无穷大系统间的功率特性曲线如图2所示,根据等面积法则,这样既减少了故障时的加速面积又增加了故障切除后的减速面积,提高了系统的暂态稳定性。



(a) 无BSS时



(b) 有BSS时

图2 发电机和无穷大系统间的功率特性曲线

1.2 含BSS的双机系统

含BSS的双机系统如图3所示。每台机附近都有一个BSS,无故障时两台机一起向负荷供电,负荷所需功率为 P_0 。在忽略电阻的情况下,两侧机组输出功率满足:

$$P_{E1} = P_2 + P_{2-BSS} \quad (3)$$

$$P_{E2} = P_3 + P_{3-BSS} \quad (4)$$

且:

$$P_2 + P_3 = P_0 \quad (5)$$

式中: P_{E1} , P_{E2} —两侧机组的输出功率; P_2 , P_{2-BSS} —左侧 U_2 母线上分别经传输线输出的功率和供给 BSS 的功率; P_3 , P_{3-BSS} —相应另一侧的功率。

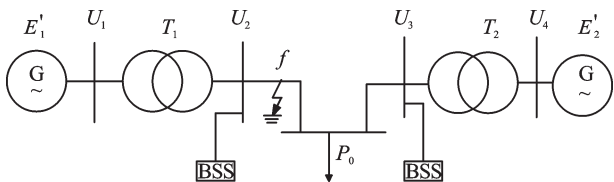


图3 含BSS的双机系统

当在图3所示位置出现三相短路故障时, P_2 迅速降到很低, P_{E1} 也随之大幅减小, 机组 E_1 机械功率大于电磁功率, 转子加速; 根据式(5), 在负荷不变的情况下, 会引起 P_3 增加, 进而 P_{E2} 会增大不少, 使机组 E_2 机械功率小于电磁功率, 转子减速。故障切除后, 情况仍然如此。如果 BSS 与网络之间的交换功率不变, 机组就有可能失稳。针对上述分析, 可同时增大 P_{2-BSS} , 减小 P_{3-BSS} , 即通过增加左侧 BSS 里充电的电池组数量, 来减轻机组 E_1 电磁功率的减少; 通过减少右侧 BSS 电池组充电数目, 必要时安排电池组放电, 来避免机组 E_2 电磁功率增加过多, 进而提高了系统的暂态稳定性。

综合以上分析可以看出, 容量较大的 BSS 除发挥正常换电功能外, 在充当系统备用、提高系统暂态稳定性方面也能起到不小的作用。本研究运用 PSASP 中的自定义模型部分对 BSS 参与系统暂态稳定控制进行建模仿真。

2 BSS 的 PSASP 建模

2.1 BSS 的控制策略

BSS 大致由蓄电池组、逆变器、控制器 3 个部分组成。具有 V2G 功能的 BSS 并网, 其端口特性与控制器的控制策略有很大关系。控制器一般分为外环控制和内环控制两个部分。外环控制是主控制器, 根据系统的需求, 向内环控制发送有功功率和无功功率的指定值; 内环控制为电压、电流控制, 通过 BSS 内充电机内开关的触发控制, 实现有功功率和无功功率的调节, 控制示意图如图4所示^[11]。

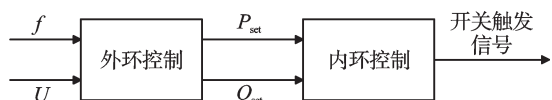


图4 BSS 控制器示意图

U , f —BSS 并网点的电压和频率; P_{set} , Q_{set} —有功和无功给定值

(1) 外环控制环节。电力系统的频率波动主要与有功功率相关, 因此 BSS 的有功出力可采用频率控制。而电力系统的电压波动在电网参数 $R \ll X$ 时, 主要由无功功率决定。本研究中的外环控制采用典型的 PI 控制, 即根据频率和电压的偏差求取外环控制的有功功率和无功功率的指定值, 外环控制示意图如图5所示。

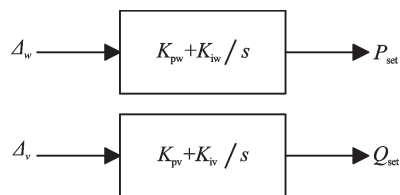


图5 外环控制示意图

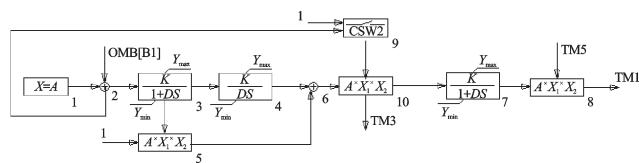
(2) 内环控制环节。内环功率控制环节可以简化为一阶动态模型, 表示如下:

$$P' = -\frac{1}{T}P + P_{set} \quad (6)$$

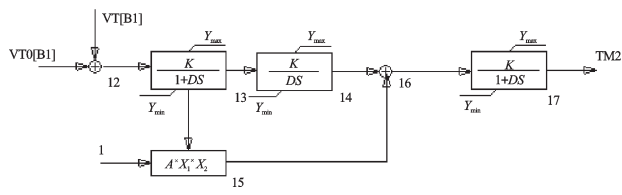
$$Q' = -\frac{1}{T}Q + Q_{set} \quad (7)$$

(3) 限制环节。在仿真中要考虑 BSS 充放电功率限制和容量限制。

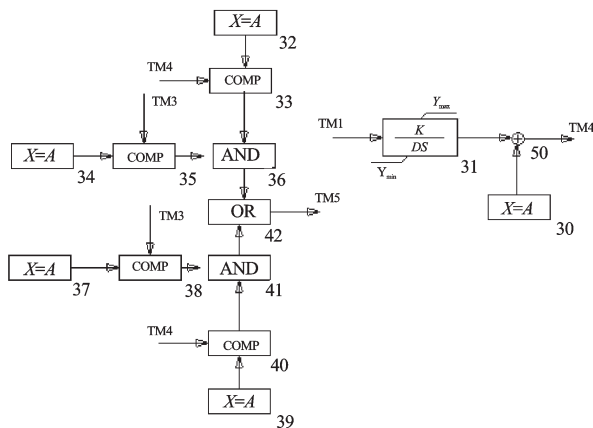
利用 PSAAP 自定义模型部分搭建的含有外环、内环控制的有功、无功输出以及限制模块如图6所示^[12]。



(a) 有功功率输出图



(b) 无功功率输出图



(c) 限制环节图

图6 BSS 功率控制器图

图6(a)中的CSW2模块是为避免系统频率在合适范围内波动导致BSS有功功率的频繁变化而设置的,OMB(B1)和VT(B1)分别为母线频率和电压,TM1、TM2分别为有功、无功输出,其他参数框图含义见文献[13]。

2.2 基于注入电流法的PSASP建模

PSASP暂态稳定计算采用时域仿真的方法,通过网络节点导纳矩阵建立微分方程,运用隐式梯形积算法求解。暂态稳定计算中,发电机、负荷模型均当作节点注入电流源。本研究也采用该方法,即将BSS输出的功率转变成节点注入电流的形式:

$$\dot{S} = \dot{U} I^* = (e + jf)(m + jn)^* \quad (8)$$

$$\dot{S} = P + jQ \quad (9)$$

解得:

$$m = \frac{eP + fQ}{e^2 + f^2} \quad (10)$$

$$n = \frac{fP - eQ}{e^2 + f^2} \quad (11)$$

式中: S —模型在接入母线注入的视在功率; U —接入母线的电压; e, f —其实部和虚部; I —注入母线的电流; m, n —其实部和虚部。

相应的PSASP模块如图7所示,各框图及参数含义见文献[13]。当忽略BSS与电网之间的无功交换功率,模型将进一步简化^[14]。

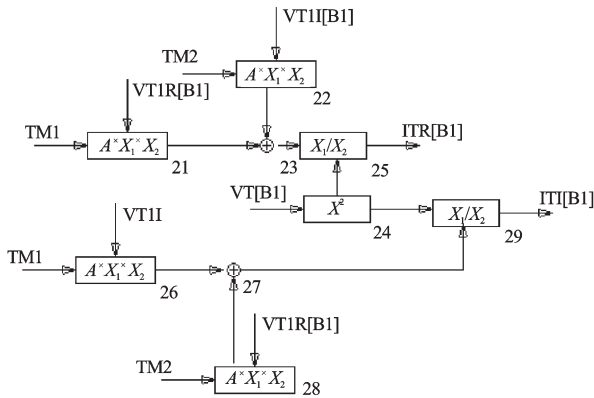


图7 BSS功率转化为注入电流图

3 算例分析

本研究的仿真分析以新英格兰10机39节点系统为例(结构图如图8所示),其包括10台发电机,39个节点,12台变压器,34条线路。

设定故障发生在线路16~17靠近母线16侧发生三相短路故障,在0.0 s发生故障,经0.15 s继电保护动作将故障切除,仿真时间取5 s。下面本研究就没有BSS参与暂态稳定控制和有BSS参与暂态稳定控制的

情况进行分析。

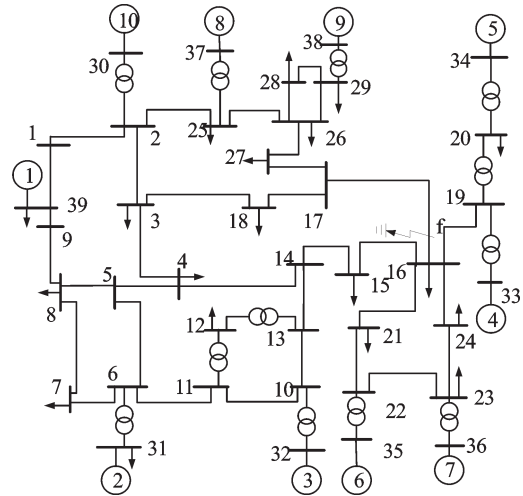
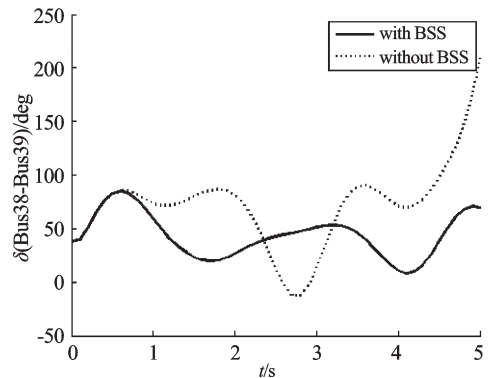
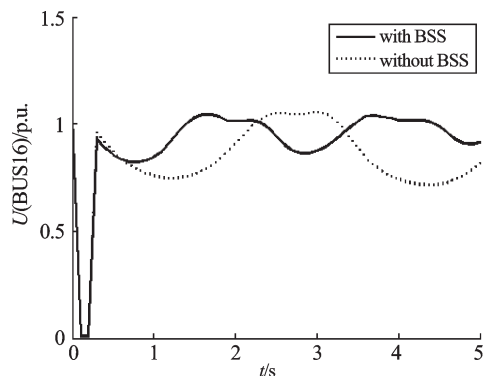


图8 10机39节点系统结构图

BSS接入母线16并参与系统暂态稳定控制后的效果图如图9所示。从功角曲线图可以看到,故障发生后没有BSS参与控制的情况下,发电机1和9之间的功角差迅速增大,很快失稳,而有BSS参与控制的情况下,功角曲线摆开的角度控制在50°以内,并很快达到稳定。从电压曲线上可以看到,接近故障点的母线16的电压在有BSS参与控制的情况下也得到了较大改善,电压平均值有很大提高。



(a) 功角曲线图



(b) 节点电压图

图9 三相故障BSS改善系统暂态稳定曲线

下面针对上述故障,就BSS接入点的位置对系统暂态稳定的影响进行仿真研究。本研究分别选择依次远离发电机母线的19、16、15母线接入BSS,仿真结果如图10所示。

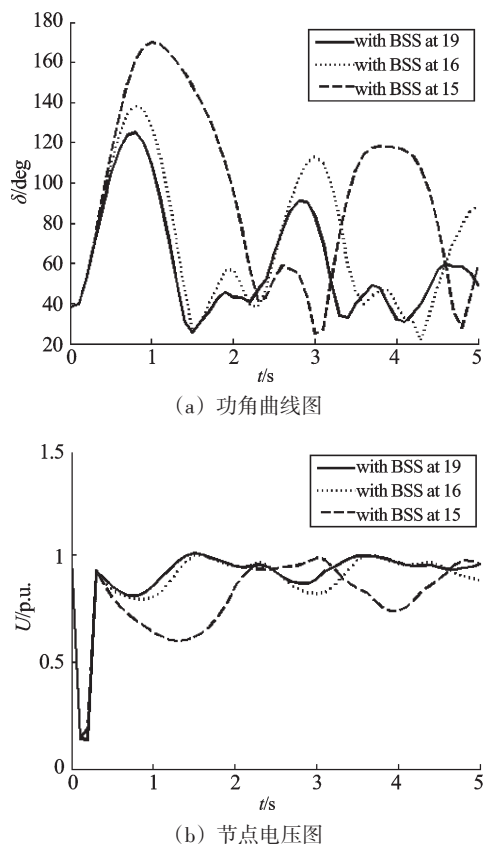


图10 BSS接入点对系统暂态稳定影响

从图10中可以看到,BSS接入点位置越靠近发电机母线,功角曲线摆开的角度越小,电压曲线平均值越大,对改善系统暂态稳定性越有利。

4 结束语

本研究在PSASP平台上对BSS进行了建模,在新英格兰系统上加入BSS模型进行了仿真计算。研究表明,当发生三相严重故障时,系统功角失稳,如果有BSS参与系统暂态稳定控制,通过与系统之间交换

功率能保证系统恢复稳定,提高电网供电质量。同时仿真对比结果显示,BSS越靠近发电机母线节点,系统在故障后恢复越快,对系统暂态稳定性的提高越明显。

参考文献(References):

- [1] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.
- [2] 高赐威,吴茜. 电动汽车换电模式研究综述[J]. 电网技术,2013,37(4):891-898.
- [3] 田文奇,和敬涵,姜久春,等. 电动汽车换电站有序充电调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(21):114-119.
- [4] ZDORNOV V, BIRK Y. Battery and energy management in fleets of switchable battery EVs [J]. *Innovative Smart Grid Technologies*, 2011(2):1-7.
- [5] WORLEY O, KLABJAN D. Optimization of Battery Charging and Purchasing at Electric Vehicle Battery Swap Stations[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference. Chicago: [s.n.], 2011:1-4.
- [6] 苗轶群,江全元,曹一家. 基于微电网的电动汽车换电站运营策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(15):33-38.
- [7] 曹一家,谭益,黎灿兵,等. 具有反向放电能力的电动汽车充电设施接入网典型方案[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):48-52.
- [8] 邱培春,葛宝明,毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(3):29-33.
- [9] 樊冬梅,雷金勇,甘德强. 超导储能装置在提高电力系统暂态稳定性中的应用[J]. 电网技术,2008,32(18):82-86.
- [10] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术,2006,30(15):54-58.
- [11] 张步涵,马智泉,谢光龙,等. 并联储能型FACTS装置的PSASP建模与仿真[J]. 电网技术,2010,34(3):31-36.
- [12] 李妍,荆盼盼,王丽,等. 通用储能系统数学模型及其PSASP建模研究[J]. 电网技术,2012,36(1):51-57.
- [13] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序(PSASP)用户手册[R]. 北京:中国电力科学研究院,2002.
- [14] 权会霞,刘宗歧. 基于代理模式的电动汽车参与调频服务PSASP建模[J]. 现代电力,2013,30(1):66-70.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

甄浩庆,王建全,杨朝阳,等. 通过电动汽车换电站提高电力系统暂态稳定性的研究[J]. 机电工程,2014,31(2):229-233.

ZHEN Hao-qing, WANG Jian-quan, YANG Chao-yang, et al. Improving power system transient stability by battery swapping station[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(2):229-233.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>