

电动汽车绝缘检测方法的设计

针对传统直流系统绝缘电阻检测准确度不高、不具有实时检测功能的问题,提出一种有源式绝缘电阻的实时检测方法。该方法分为故障检测和绝缘电阻计算两个检测等级。故障检测基于有源式思想,实时监测绝缘电阻的状态;在检测到绝缘电阻异常后进行绝缘电阻计算,该阶段基于外接电阻的方法准确地计算绝缘电阻值。实验结果表明,绝缘电阻实时检测的故障误报率在4.4%以内,实现了电动汽车绝缘电阻的实时、高准确度检测。

蒋英明¹ 林 勇² 王 强³ 王 远¹ 郑晓露¹ / 1. 国网电科院江苏瑞中数据股份有限公司 2. 湖南森泰能源科技股份有限公司 3. 中南大学物理与电子学院

0 引言

电池组作为电动汽车的动力源,其运行指标的优劣直接决定着电动汽车整车的性能。为了较高地输出功率,纯电动汽车电池组的电压一般大于300 V^[1],这对高电压电池组与车辆底盘之间的绝缘性能提出了更高的要求。电池组在电动汽车车辆实际运行中会受粉尘、震动、潮湿和绝缘介质老化等因素的影响,导致高电压电池组与车辆底盘之间绝缘性能严重下降。进而可能导致故障、起火等安全事故,严重威胁人员、电气设备的安全。因此,研究高电压电动汽车电池组的绝缘电阻实时检测,对于提高绝缘电阻故障检测水平具有重要意义。

目前,国内外专家对电动汽车电池组的绝缘电阻检测方法都有一定研究。文献[2-3]采用外接电阻切换方法,该方法利用定期离线方式对直流系统进行检

测,不具有实时检测特性;文献[4-5]采用直流漏电流检测方法,相比外接电阻切换方法,其在两个与正、负极绝缘电阻并联的电阻中间增加了一个电流传感器,用以测量该直流漏电流值;文献[6-7]采用平衡电桥方法,它通过外接电阻判断外接电阻与绝缘电阻电桥是否平衡,并判断绝缘电阻是否异常,因此不能准确检测绝缘电阻、并联外部电阻降低系统的绝缘性能,不具有实时检测特性。

综上所述,传统直流系统绝缘电阻检测方法不具有实时检测特性,存在检测准确度不高的问题,可能导致故障检测系统失效或误报,严重时会引起安全事故。因此,本文提出一种有源式直流系统绝缘电阻检测方法,该方法实现了直流系统绝缘电阻的实时监测,同时通过实验验证了该方法能够达到较高的检测准确度,为电动汽车安全运行提供了实时的保障。

1 有源式绝缘电阻检测方法

有源式直流系统(电动汽车电池组)绝缘电阻检测方法可分为故障检测和绝缘电阻计算两个检测等级。其等效电路如图1所示,故障检测通过测量电阻 R 两端的电压,即可计算出正、负绝缘电阻的并联电阻值,并由该值来判断系统正、负极绝缘电阻的故障状态;在检测到绝缘电阻故障后,断开负载 R_L 、交流信号源 U_s (系统处于离线状态),并进行绝缘电阻计算,再分别测量接入电阻 R_1 、 R_2 两端电压值,则可准确计算出正、



蒋英明/工程师

关键词/Keywords

绝缘电阻检测·
电动汽车·
电池组·
绝缘电阻·

国家电网科技项目(62KJ130501B1003620120)。

负极绝缘电阻 R_p 、 R_n 值。绝缘电阻的准确计算为电动汽车整体故障诊断提供依据。

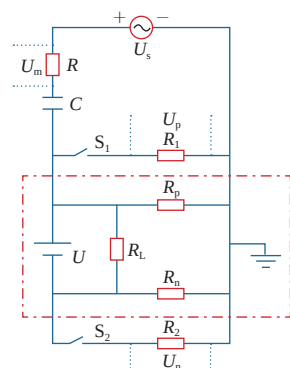


图1 有源式绝缘检测的等效电路

图1中，点画线框以内为被检测直流系统的等效电路部分： U 为直流系统的电压源， R_L 为等效负载， R_p 、 R_n 分别为直流系统电压源正、负极对地的绝缘电阻；点画线框以外的部分为辅助添加的测量电路： U_s 为低频率的交流信号源， R 为测量电阻， C 为隔离电容， R_1 、 R_2 为绝缘电阻计算时的接入电阻。故障检测时， S_1 、 S_2 为打开状态；绝缘电阻计算时， S_1 、 S_2 为闭合状态。

该方法的实现流程如图2所示，具体步骤如下。

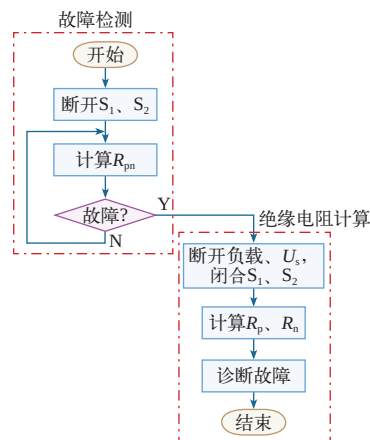


图2 绝缘电阻检测流程

故障检测：

- 1) 系统初始化。
- 2) 断开接入电阻 R_1 、 R_2 。
- 3) 通过测量电阻 R 两端的电压，则可计算出正、负极绝缘电阻的并联电阻值 R_{pn} 。
- 4) 由该值判断系统的正、负极绝缘电阻是否

故障，若绝缘电阻正常，则循环执行步骤3)；否则，进行绝缘电阻计算。

绝缘电阻计算：

- 1) 首先断开负载 R_L 和交流信号源 U_s ，再接入电阻 R_1 、 R_2 。
- 2) 分别测量接入电阻两端的电压值，并计算出正、负极绝缘电阻 R_p 、 R_n 值。
- 3) 绝缘电阻故障信息输出。
- 4) 绝缘电阻检测结束。

1.1 故障检测

基于有源式思想的故障检测，是通过注入低频交流信号实现绝缘电阻故障的实时监测。

设备运行之前断开开关 S_1 、 S_2 ，其等效电路如图3所示，因此可得

$$U_m = \frac{R}{\sqrt{R^2 + R_{pn}^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} U_s \quad (1)$$

式中， U_s 为交流信号源； ω 为交流信号源的频率，且 $2 \leq \omega \leq 100 \text{ Hz}$ ； R_{pn} 为 R_p 、 R_n 的并联电阻，即

$$R_{pn} = \frac{R_p R_n}{R_p + R_n} \quad (2)$$

式中， R_p 、 R_n 均为被监测的未知量。由式(1)、式(2)可得

$$R_{pn} = \sqrt{\frac{R^2 U_s^2}{U_m^2} - R^2 - \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3)$$

式(3)可计算出 R_p 、 R_n 的并联电阻 R_{pn} ，并由 R_{pn} 与设定的阈值 R_{th} 进行比较，可判断出绝缘电阻的状态。

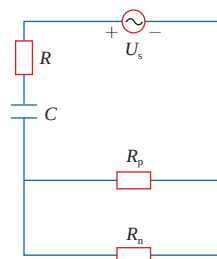


图3 故障检测等效电路

故障的判断依据：在正常情况下，绝缘电阻值 $R_p = R_n$ ，同时由式(2)可得， R_{pn} 小于绝缘阻值 R_p 、 R_n ，即

$$R_{pn} < x \quad (x \in \{R_p, R_n\}) \quad (4)$$

因此,判断 R_{pn} 是否小于阈值 R_{th} 。若是,则绝缘电阻故障;否则绝缘电阻正常。

从图3可看出,该故障检测方法可实时监测绝缘电阻的故障状况,且交流信号源 U_s 对整个负载回路没有任何的影响。

1.2 绝缘电阻计算

绝缘电阻故障后,为进一步确定故障源,需要准确计算绝缘电阻值,该计算结果可为整个系统的故障诊断提供依据。

在检测到绝缘电阻故障之后,断开负载 R_L ,关闭交流信号源 U_s ;再闭合开关 S_1 、 S_2 ,接入电阻 R_1 、 R_2 ;最后得到的等效电路如图4所示,由图4可得

$$\frac{R_p R_1}{R_p + R_1} \frac{R_n + R_2}{R_n R_2} = \frac{U_p}{U_n} \quad (5)$$

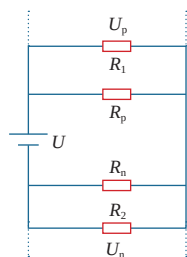


图4 绝缘电阻计算等效电路

联立式(3)、式(5)推导出正、负极绝缘电阻值的计算公式为

$$\begin{cases} R_n = \frac{R_{pn} U_n R_2 R_1 + R_{pn} U_p R_2 R_1}{U_p R_2 R_1 + U_p R_p R_2 - U_n R_{pn} R_1} \\ R_p = \frac{R_{pn} R_n}{R_n - R_{pn}} \end{cases} \quad (6)$$

综上所述,通过绝缘故障检测及绝缘电阻计算的两个过程,形成一种实时、准确的绝缘电阻检测方法。该方法既实现了绝缘电阻故障的实时监测,同时也满足了异常后的绝缘电阻准确计算,且实时状态监测过程对整个负载电路无影响。

2 实验验证

2.1 实验参数配置

本文以某电动汽车电池组为实验对象,其电池

组的输出电压为350 V;根据国家技术标准,车载电池组的绝缘电阻大于500 Ω/V 。因此,计算出的正、负极绝缘电阻均要大于175 k Ω (300 V $\times$ 500 Ω/V = 175 k Ω)。为实时监测车载电池组系统的状态,可将故障阈值设置为 R_{th} = 175 k Ω ,当 R_{pn} 小于阈值 R_{th} 时,系统发出故障报警。

考虑到绝缘电阻故障检测电路测量准确度、测量周期、稳定时间及阈值大小的问题,实验配置参数设置如表1所示。

表1 参数配置

参数	U	U_s	R	C	R_L
数值	350 V	5 V/10 Hz	100 Ω	1 μF	5 k Ω

由表1的配置参数可推导出系统的部分性能,即测量周期 T = 0.1 s;稳定时间 $t_s \approx 4(R + R_{pn})C$ 。在正常情况下, R_{pn} 值在1~10 M Ω 之间,稳定时间在几秒到几十秒之间。然而,在故障情况下,系统响应时间在1 s以内;测量灵敏度如下

$$U_m = \frac{R}{\sqrt{R^2 + R_{pn}^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} U_s \quad (7)$$

式中,参数 R_{pn} 与 $1/(\omega C)$ 在同一数量级,则测量灵敏度较高。

2.2 实验及结果分析

故障检测的Sumilink仿真模型如图5所示。

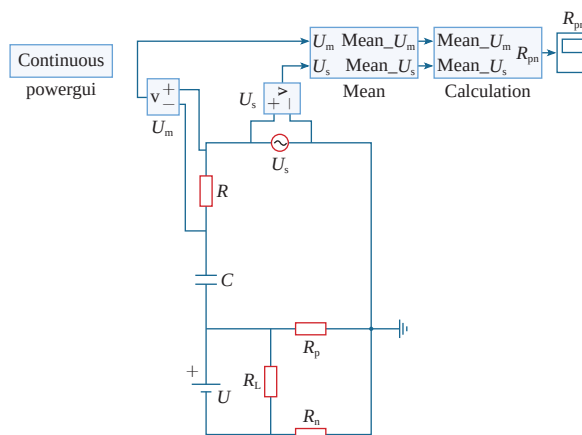


图5 故障检测仿真模型

图5中,下部分为故障检测电路,其符号与图1一致。上半部分为故障检测的测量与计算部分,

模块Mean计算交流信号源 U_s 和测量电阻 R 端电压 U_m 的有效值，其内部的封装如图6所示；模块Calculation计算正、负极绝缘电阻的并联电阻值 R_{pn} 。

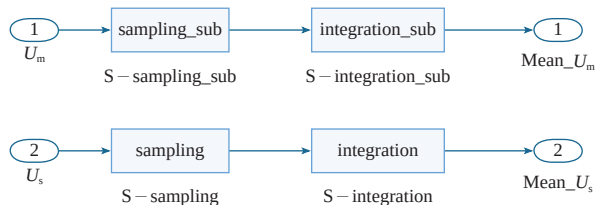


图6 Mean封装模块

Mean模块由两个通道构成，分别对交流信号源 U_s 、测量电阻 R 的端电压 U_m 进行采样，并积分求得各个电压平均值 $Mean_U_m$ 、 $Mean_U_s$ 。其中，采样模块Sampling、Sampling_sub以及积分模块Integration、Integration_sub均由Sumilink软件S函数编程实现。

Calculation模块实现了式(7)的计算，Mean模块计算得到交流信号源 U_s 、测量电阻 R 的端电压 U_m 的平均值，再根据式(7)计算得到正、负极绝缘电阻的并联电阻值 R_{pn} 。

本文设置了6组实验，其数据的范围包括绝缘电阻正常状态和不同程度的故障状态。具体实验结果如表2所示。

表2 实验结果

实验序号	输入参数		实验结果	
	$R_p/k\Omega$	$R_n/k\Omega$	$R_{pn}/k\Omega$	误差 (%)
0	2 000	2 000	999.85	0.15
1	2 000	150	137.82	1.20
2	700	700	349.38	0.17
3	150	150	71.73	4.36
4	175	175	84.71	3.19
5	350	150	102.69	1.50

由表2可知，电动汽车电池组绝缘电阻故障检测的误差在4.4%以内，实现了绝缘电阻的实时检测。当检测到绝缘电阻故障以后，系统离线采用外接电阻方法并配合实时故障检测方法实现绝缘电阻值的准确计算。

3 结束语

本文分析了传统直流系统绝缘电阻检测方法存在的技术缺陷，提出了一种有源式直流系统绝缘电阻的实时检测方法。该方法实现了电动汽车电池组绝缘电阻状态的实时监测，且对负载回路没有影响；在监测到绝缘电阻故障后，增加了相应的电路装置，则可计算出正、负极绝缘电阻值，为电动汽车整体的故障诊断提供依据。实验结果表明，绝缘电阻实时检测的故障误报率在4.4%以内，实现了电动汽车绝缘电阻状态的实时、高准确度检测，具有很好的应用价值。

参考文献

- [1] Wu J, Wang Y. A kind of on-line insulation detection method based on ladder-shape signal injection for ship's engine room automation equipment [C]. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, IEEE Computer Society, Piscataway, NJ, USA, 2011: 1885-1889.
- [2] 程玉佼, 魏学哲, 戴海峰. 基于绝缘电阻模型的电动汽车高压电漏电监测 [J]. 汽车工程学报, 2012 (6): 7.
- [3] 周晨, 胡社教, 沙伟, 等. 电动汽车绝缘电阻有源检测系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27 (5): 409-414.
- [4] Zhang J, Wen H. Insulation resistance monitoring system on pure electric vehicles [J]. Light Industry Machinery, 2013 (1): 14.
- [5] 王晓俊, 周杏鹏, 王毅, 等. 一种宽量程高准确度绝缘电阻测量仪设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26 (2): 155-160.
- [6] Zhang J, Wen H. Insulation resistance monitoring system on pure electric vehicles [J]. Light Industry Machinery, 2013 (1): 14.
- [7] 郭宏榆, 姜久春, 温家鹏, 等. 新型电动汽车绝缘检测方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011 (3): 253-257.

(收稿日期: 2015-02-10) EA