

双阳离子型离子液体的研究进展

王军, 武金超, 杨许召, 王满满, 苗进辉

(郑州轻工业学院 河南省表界面科学重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:对双阳离子型离子液体的合成路线及其密度、熔点/玻璃化温度、热稳定性、表面张力和黏度等物理化学性质与结构之间的关系进行了综述. 目前双阳离子型离子液体的研究主要集中在各种新型离子液体合成和物化性能研究, 而其体系的热力学性质及量化计算和分子模拟等方面的研究还比较缺乏. 今后应着力于确定双阳离子型离子液体结构与性能间的构效关系以及建立相应的模型.

关键词:双阳离子型离子液体; 合成; 物理化学性质

中图分类号:TQ413 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.04.002

Research progress of dicationic ionic liquids

WANG Jun, WU Jin-chao, YANG Xu-zhao, WANG Man-man, MIAO Jin-hui

(He'nan Provincial Key Laboratory of Surface and Interface Science,
Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The synthesis methods of dicationic ionic liquids and the relationship between their structures and physicochemical properties including density, melting point/glass transition temperature, thermostability, surface tension and viscosity were reviewed. Nowadays, the dicationic ionic liquids research are focused on synthesis of new species and physicochemical properties. The investigation on dicationic ionic liquids is quite self-evident in the scarcity of the thermodynamic properties, the quantitative calculation and molecular simulation. In the future, the attention for dicationic ionic liquids will be determining the structure-activity relationship and the corresponding model building.

Key words: dicationic ionic liquids; synthesis; physicochemical properties

0 引言

环境友好与绿色化是国际化学研究的前沿,也是化学与化工企业在21世纪能够可持续发展的决定因素^[1-4]. 世界各国的化学界和企业界正在重新考虑、改造和设计现有的“三废”高和环境污染严重的传统有机溶剂,而离子液体作为“清洁”的溶剂和新催化体系正受到业界的普通关注和接受. 同传统

的分子溶剂相比,它们具有更好的热稳定性和化学稳定性、更宽的液程、更低的蒸汽压,适于在较高温度下工作^[5-10],对多种有机无机材料具有良好的溶解度^[11-12];更独特的是依据组成离子液体的阳离子和阴离子种类不同,室温离子液体的物理化学性质有很大的差别,理论上可以根据要求进行离子液体设计^[13].

传统的单阳离子型离子液体的热稳定性较低,

收稿日期:2013-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(21176228)

作者简介:王军(1961—),男,陕西省凤翔县人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为表面活性剂及离子液体的合成及应用.

在应用方面受到一定的限制,开发热稳定性较好的双阳离子型离子液体成为了一个热点.本文拟就双阳离子型离子液体的分类、合成及其物化性能进行评述.

1 双阳离子型离子液体的合成

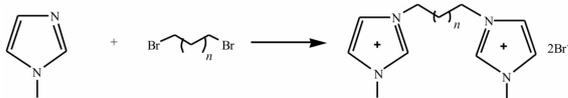
双阳离子型离子液体(DILS)可分为对称和非对称双阳离子型离子液体2大类.对称双阳离子型离子液体是指2个阳离子和2个阴离子完全相同、阳离子通过一个连接基连接的离子液体.非对称双阳离子型离子液体一般包括2种:一种是2个阳离子不同而阴离子相同的双阳离子液体,另一种是2个阳离子和2个阴离子都不同的一类离子液体.

在双阳离子型离子液体分子中,中间连接基不仅可以是一个直链烷基,也可以是一个含苯环的基团^[14]或者一个醚类的有机基团^[15]等.从理论上讲,改变不同的阳离子/阳离子、阳离子/阴离子、阴离子/阴离子组合可以设计合成的双阳离子型离子液体不计其数,但当前研究种类仍为数不多.

1.1 对称双阳离子型离子液体的合成

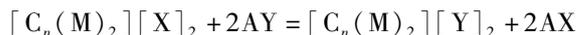
对称双阳离子型离子液体的合成相对比较简单,一般通过2步反应即可完成.

1.1.1 季铵化反应 以短链醇,如甲醇、乙醇或异丙醇作为反应溶剂,将摩尔比为2:1的阳离子母体和季铵化试剂反应制得目标离子液体的卤盐^[16-17].如在乙醇中由N-甲基咪唑和二溴代烷制备 $[C_n(\text{Mim})_2][\text{Br}]_2$ 的反应方程式如下^[18-19]:



反应所用的阳离子母体除了N-烷基咪唑外,还有其他的胺,例如嘧啶、异喹啉、吗啉、2-甲基吡咯啉、三烷基胺、苯并三唑、磷、四唑、胍等,季铵化试剂一般选用二卤代烷.季铵化反应一般在醇类等极性有机溶剂中进行,反应温度取决于溶剂和卤代烷的沸点.一般阳离子母体稍微过量,季铵化反应基本可定量完成,反应结束后蒸出过量的卤代烷和有机溶剂得到鎓盐.

1.1.2 复分解反应 为了使含卤素离子的离子液体转化为所需阴离子的离子液体,将上述合成的鎓盐在适当溶剂中与所需的阴离子盐或酸进行复分解反应得到目标离子液体.反应方程式如下:



式中:X为Cl, Br, I; Y为所需的阴离子; M为阳离子; A为金属离子.

复分解反应的关键在于阴离子盐或酸以及溶剂的选择,目的是使复分解反应的平衡尽可能向右移动.如为了制备阴离子为 $[\text{BF}_4]^-$ 的离子液体,可以用 AgBF_4 或 NH_4BF_4 为反应试剂,以甲醇或丙酮为溶剂,由于反应生成的卤化银或卤化铵不溶于有机溶剂,能使复分解反应完成.对阴离子为 $[\text{PF}_6]^-$ 的离子液体,可以直接用 HPF_6 进行反应.对一些疏水性离子液体也可以用水作为溶剂,如阴离子为 $[\text{NTf}_2]^-$, $[\text{PF}_6]^-$ 等时.

1.2 非对称双阳离子型离子液体的合成

非对称双阳离子型离子液体的合成包括中间体的合成、含卤素离子的离子液体合成及所需阴离子类型离子液体的置换等步骤.

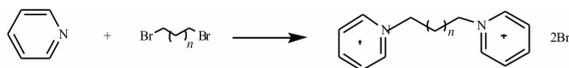
1.2.1 具有相同阴离子的非对称双阳离子型离子液体的合成

1) 含卤素离子的中间体合成

通过控制反应条件,先用阳离子母体和季铵化试剂反应合成单取代的卤盐中间体,以中间体 $[\text{PyC}_n-\text{Br}][\text{Br}]_2$ 为例^[13,20-22],合成路线如下:



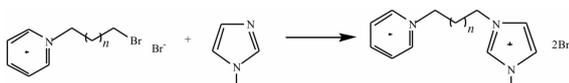
在本步反应中,容易发生以下副反应:



副产品为双取代的对称双阳离子型离子液体,它与目标产品的溶解性类似,很难采取常规的分离提纯方法将其除去,因此需要通过控制反应的工艺条件得到所需纯度的中间体.工艺条件控制包括:温度的选择不宜过高,加大吡啶和二溴代烷物质的量比,选择滴加的加料方式等.

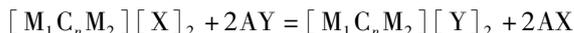
2) 含卤素离子的离子液体合成

将上述合成的中间体和另一种不同的阳离子母体反应得到含卤素离子的非对称双阳离子型离子液体^[13,20-22].



3) 阴离子置换

具有相同阴离子的非对称双阳离子型离子液体和对称双阳离子型离子液体阴离子置换过程完全相同,反应方程式如下:



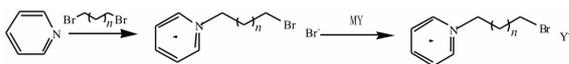
1.2.2 具有不同阴离子的非对称双阳离子型离子液体的合成

1) 含卤素离子的中间体合成

用阳离子母体和季铵化反应合成单取代的卤盐中间体,过程和工艺控制重点如上所述.

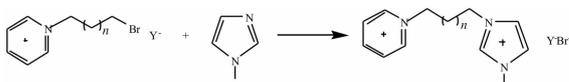
2) 非卤素离子的中间体合成

利用复分解反应,用含有期望阴离子的盐与上述含卤素离子的中间体反应,得到非卤素离子的中间体.例如,中间体 $[PyC_n-Br][Y]$ 的合成路线如下^[13,21]:



3) 不同阴离子的非对称双阳离子型离子液体的合成

用上述反应得到的非卤素离子的中间体与另外一种阳离子母体进行反应制备目标离子液体.目标离子液体 $[PyC_nMim][BrY]$ 的合成路线如下^[13,21]:



2 双阳离子型离子液体的物化性能

双阳离子型离子液体在密度 ρ ,熔点 T_m /玻璃化

温度 T_g ,热分解温度 T_d ,表面张力 γ 和切变黏度 H 等都有不同于传统的单阳离子型离子液体的物化性能^[15,23-25],部分离子液体的物化性能数据见表1.

2.1 密度

由表1可见,离子液体的密度都较大,是水密度的1.0~1.6倍.双阳离子型离子液体比与其阴离子相同、且具有相对应的碳链长度的单阳离子型离子液体(例如, C_6 对应的是双阳离子型离子液体, C_3 对应的是单阳离子型离子液体,以两者对比)的密度都要偏大.双阳离子型离子液体的密度主要由阴离子决定,在相同阳离子时,密度的大小受阴离子的影响如下: $Br^- > BF_4^- > TfO^- > PF_6^- > NTF_2^-$.然而阳离子对离子液体的密度也有一定影响,随着2个阳离子连接基碳链长度的增加,双阳离子型离子液体的密度呈逐渐减小的趋势.

从表1中还可以看出,对称双阳离子型离子液体的密度一般大于同类的非对称双阳离子型离子液体.如 $[C_5(Mim)_2][NTf_2]_2$ 的密度为 $1.57 g \cdot cm^{-3}$,而 $[N_{111}C_5Mim][NTf_2]_2$ 的密度为 $1.54 g \cdot cm^{-3}$,这是由于前者的对称结构更有益于分子的紧密堆积所致.

2.2 熔点

离子液体熔点一般是由阴离子和阳离子之间的晶格能所决定,微观上有3方面:1)分子间作用力,分子间作用力越大,熔点越高;2)化合物分子

表1 部分离子液体的物性数据

离子液体	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	T_g/K	T_m/K	T_d/K	$\gamma/(mN \cdot m^{-1})$	$H/(cP)$
$[C_4(Mim)_2][NTf_2]_2$	—	—	332.50	706.40	—	—
$[C_5(Mim)_2][NTf_2]_2$	1.57	—	212.15	638.35	25.1	—
$[C_6(Mim)_2][NTf_2]_2$	1.55	209.9	—	700.10	41.1	738.9
$[C_8(Mim)_2][NTf_2]_2$	1.50	212.0	—	694.30	40.3	662.9
$[C_{10}(Mim)_2][NTf_2]_2$	1.46	215.8	—	689.40	39.4	720.6
$[C_3Mim][NTf_2]_2$	1.48	185.8	—	672.00	35.9	42.8
$[C_4Mim][NTf_2]_2$	1.44	188.1	269.20	676.20	34.9	49.4
$[C_5Mim][NTf_2]_2$	1.40	189.6	267.10	670.40	34.0	59.1
$[N_{111}C_5Mim][NTf_2]_2$	1.54	—	221.65	574.65	—	35.7
$[N_{111}C_5(2-MMim)][NTf_2]_2$	1.53	—	315.15	571.05	—	—
$[N_{111}C_5Mim][NTf_2]_2$	1.54	—	218.95	406.05	—	39.8
$[N_{111}C_5Pim][NTf_2]_2$	1.47	—	220.15	662.15	—	52.7
$[N_{111}C_5N_{111}][NTf_2]_2$	1.33	—	360.15	636.85	—	—
$[N_{111}C_5P_{333}][NTf_2]_2$	1.02	—	306.15	450.15	37.3	—
$[N_{111}C_5Mim][Br]_2$	1.63	—	326.15	363.65	—	—
$[N_{111}C_5Mim][PF_6]_2$	1.37	—	388.15	585.55	—	—
$[(N_{111})C_5(Mim)][BF_4]_2$	1.57	—	359.15	600.05	—	—
$[(N_{111})C_5(Mim)][TfO]_2$	1.50	—	—	589.05	—	—

结构的对称性,分子对称性越好,熔点也就越高;3)构象的自由度,分子的构象越稳定,熔点越高.根据其微观机理及以上对离子液体熔点的分析,可以推测出双阳离子型离子液体熔点有以下影响因素:1)阳离子连接基的碳链长度.随着碳链长度的增加,熔点逐渐升高,当碳链超出一定的长度时,它们的熔点又开始下降,呈倒“钟型”.2)阳离子的类型.阴离子相同时,阳离子对熔点的影响为三甲胺>三丁基膦>2,3-二甲基咪唑>吡啶>3-甲基咪唑.3)阳离子上取代基的位置.[$N_{111}C_5Mim$][NTf_2]₂的熔点为221.65 K,然而当其咪唑环的2位上有一个甲基取代基时,其熔点变为315.15 K,可见取代基的位置对离子液体的熔点影响很大.4)阴离子的类型.从表1可以看出,阴离子的影响大小按以下排列, $TfO^- > Br^- > PF_6^- > BF_4^- > NTf_2^-$.双阳离子型离子液体的玻璃化温度和熔点都较单阳离子型离子液体高,即双阳离子型离子液体在低温范围的熔程较窄,这也是限制其应用的一个主要因素.

2.3 热稳定性

当阴离子为无机阴离子时,阴离子自身的热稳定性较好.因此,双阳离子型离子液体的热分解温度主要由阳离子决定.从表1中 T_d 可知,双阳离子型离子液体的热分解温度能达到500 K到800 K,较其相对应的单阳离子型离子液体高出20 K以上.J. L. Anderson等^[6]研究了39种双阳离子型离子液体的结构和热稳定性的关系,其中传统单阳离子型离子液体[C_4Mim][NTf_2]₂的热稳定温度为458.15 K,而用相同的阳离子合成的双阳离子型离子液体的热稳定温度达到了673.15 K.也就是说,在高温范围内,双阳离子型离子液体具有更宽的液程,这是其在高温领域应用的一个突出优势.T. Payagala等^[26]根据双阳离子型离子液体稳定性高的特性,将双阳离子型离子液体用作高选择性、高热稳定性的色谱固定相,达到了良好的分离选择效果.

2.4 表面张力和黏度

表1所示为298.15 K下离子液体的表面张力和切变黏度.从表中可以看出,当阴离子相同时,无论是单阳离子型离子液体或者双阳离子型离子液体的表面张力都随着烷基链的增长而下降.刘青山等^[27]测定了单阳离子型离子液体[C_nPy][NTf_2]在温度298.15 K的表面张力值,其烷基链碳数 $n=2, 4$ 和5时,表面张力的值依次减小.H. Shirota等^[23]报道了双阳离子型离子液体的表面张力和离子液

体烷基链的关系,其表面张力也是随着烷基链的增长而下降.H. Jin等^[28]报道了熔盐(包括离子液体)的摩尔体积和表面张力的经验关系式.

在黏度方面,当阴离子相同,具有相对应的碳链长度的双阳离子型离子液体的黏度是单阳离子型离子液体的13~80倍.咪唑基团之间具有强烈的离子间相互作用,致使其黏度增大.双阳离子型离子液体的黏度随连接基碳链长度的增长呈线性增长,这和之前报道的单阳离子型离子液体的变化规律相符^[29-31].一般升高温度可以降低双阳离子型离子液体的黏度.双阳离子型离子液体的黏度较大也是其用作气-液色谱固定相的一个优势,较大的黏度使其更容易在担体上附着^[32-33].

3 结语

双阳离子型离子液体由于结构的可设计性,可以通过改变阳离子母体、阴离子种类和连接基来设计合成出所需要物化性能的离子液体,为离子液体的实际应用提供了可能性.同时,双阳离子型离子液体具有良好的热稳定性,有利于离子液体作为高温合成反应介质、萃取介质、分离介质等^[34-36],比传统离子液体具有明显的优越性.目前,人们对双阳离子型离子液体的认识还十分有限,对双阳离子型离子液体的研究主要集中在各种新型离子液体合成和物化性能研究,缺乏体系的热力学性质及量化计算和分子模拟的研究.确定双阳离子型离子液体结构与性能间的构效关系,建立相应模型,可以更加有效地指导特定性能离子液体的设计合成和应用并为非对称双阳离子型离子液体的开发、应用和绿色化工过程奠定实验和理论基础.

参考文献:

- [1] Rogers R D, Seddon K R. Ionic liquids-solvents of the future[J]. Science, 2003, 302(5646): 792.
- [2] Rogers R D, Materials science; Reflections on ionic liquids[J]. Nature, 2007, 447(7147): 917.
- [3] Armstrong D, Huang J. High stability polyionic liquid salts [P]. US:2008095069, 2008-08-07.
- [4] 何鸣元,戴立益.离子液体与绿色化学[J].化学教学, 2002(6): 1.
- [5] Han X, Armstrong D W. Using geminal dicationic ionic liquids as solvents for high-temperature organic reactions [J]. Organic Lett, 2005, 7(19): 4205.
- [6] Anderson J L, Ding R, Ellern A, et al. Structure and prop-

- erties of high stability geminal dicationic ionic liquids [J]. *J Am Chem Soc*, 2005, 127(2):593.
- [7] 孙南. 离子液体及其功能化设计[J]. *山东化工*, 2008, 37(2):26.
- [8] 赵三虎, 康丽娜, 岳长亮, 等. 一种含羟基的双核离子液体的合成[J]. *化学试剂*, 2010, 32(9):851.
- [9] Renee J, Soukup-Hein Jeffrey W. Evaluating the use of tricationic reagents for the detection of doubly charged anions in the positive mode by ESI-MS[J]. *Anal Chem*, 2008, 80(7):2612.
- [10] Pitawala J, Matic A, Martinelli A, et al. Thermal properties and ionic conductivity of imidazolium bis (trifluoromethanesulfonyl) imide dicationic ionic liquids [J]. *J Phys Chem B*, 2009, 113(31):10607.
- [11] Li X, Bruce D W, Jean'ne M S. Dicationic imidazolium-based ionic liquids and ionic liquid crystals with variously positioned fluoro substituents[J]. *J Mater Chem*, 2009, 19(43):8232.
- [12] Wang J, Wu S D, Yang X Z. Solubility of 1,1'-(butane-1,4-diyl)-bis(3-methylpyridinium) dihexafluorophosphate in different solvents from (288.15 ~ 333.15) K [J]. *J Chem Eng Data*, 2010, 55(9):3942.
- [13] Chang J C, Ho W Y, Sun I W, et al. Synthesis and characterization of dicationic ionic liquids that contain both hydrophilic and hydrophobic anions [J]. *Tetrahedron Lett*, 2010, 66(32):6150.
- [14] Ganesan K, Alias Y. Synthesis and characterization of novel dimeric ionic liquids by conventional approaches[J]. *Int J Mol Sci*, 2008, 9(7):1207.
- [15] Kärnä M, Lahtinen A M. Physicochemical properties of new dicationic ether-functionalized low melting point ammonium salts[J]. *Aust J Chem*, 2010, 63(7):1122.
- [16] Liu Q, Rantwijk F Van, Sheldon R A. Synthesis and application of dicationic ionic liquids[J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 2006, 81(3):401.
- [17] McEwen A B. Cyclic delocalized cations connected by spacer groups [P]. US:6531241, 2003-04-11.
- [18] 王军, 张真真, 杨许召, 等. 双阳离子型离子液体的合成与性能[J]. *化学试剂*, 2009, 31(9):719.
- [19] 梁金花, 徐玥, 任晓乾, 等. Brønsted 酸性功能化双核离子液体制备及催化合成醋酸丁酯研究[J]. *高校化学工程学报*, 2011, 25(3):519.
- [20] Zhang Z X, Zhou H Y, Li Y, et al. Asymmetrical dicationic ionic liquids based on both imidazolium and aliphatic ammonium as potential electrolyte additives applied to lithium secondary batteries [J]. *Electrochim Acta*, 2008, 53(14):4833.
- [21] Chang J C, Ho W Y, Sun I W, et al. Synthesis and properties of new tetrachlorocobaltate (II) and tetrachloromanganate (II) anion salts with dicationic counterions [J]. *Polyhedron*, 2011, 30(3):497.
- [22] Yu G Q, Yan S Q, Zhou F, et al. Synthesis of dicationic symmetrical and asymmetrical ionic liquids and their tribological properties as ultrathin films [J]. *Tribology Lett*, 2007, 25(3):197.
- [23] Shirota H, Mandai T, Fukazawa H, et al. Comparison between dicationic and monocationic ionic liquids; Liquid density, thermal properties, surface tension, and shear viscosity [J]. *J Chem Eng Data*, 2011, 56(5):2453.
- [24] Tariq M, Forte P A S, Gomes M F C. Densities and refractive indices of imidazolium-and phosphonium-based ionic liquids: Effect of temperature, alkyl chain length, and anion [J]. *J Chem Thermodynamic*, 2009, 41(6):790.
- [25] Payagala T, Huang J M, Breitbach Z S, et al. Unsymmetrical dicationic ionic liquids; Manipulation of physicochemical properties using specific structural architectures [J]. *Chem Mater*, 2007, 19(24):5848.
- [26] Payagala T, Zhang Y, Wanigasekara E, et al. Trigonal tricationic ionic liquids; a generation of gas chromatographic stationary phases [J]. *Anal Chem*, 2008, 81(1):160.
- [27] 刘青山, 颜佩芳, 杨森, 等. 离子液体 [C_nPy] [NTf₂] (n = 2, 4, 5) 的动力黏度和电导率 [J]. *物理化学学报*, 2011, 27(12):2764.
- [28] Jin H, O' Hare B, Dong J, et al. Physical properties of ionic liquids consisting of the 1-butyl-3-methylimidazolium cation with various anions and the bis (trifluoromethylsulfonyl) imide anion with various cations [J]. *J Phys Chem B*, 2008, 112:81.
- [29] Liu Q S, Yang M, Yan P F, et al. Density and surface tension of ionic liquids [C_npy] [NTf₂] (n = 2, 4, 5) [J]. *J Chem Eng Data*, 2010, 55:4928.
- [30] Tokuda H, Tsuzuki S, Susan M A B H, et al. A molecular dynamics investigation of the structural and dynamic properties of the ionic liquid 1-n-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethane sulfonyl) imide [J]. *J Phys Chem B*, 2006, 110:19593.
- [31] 肖峰, 王冠楠, 吴有庭, 等. 低熔点低黏度的季铵盐类离子液体的合成与表征 [J]. *南京大学学报:自然科学版*, 2010, 46(2):184.
- [32] Zhi H Z, Lü C X, Zhang Q, et al. A new PEG-1000-based dicationic ionic liquid exhibiting temperature-dependent phase behavior with toluene and its application in one-pot synthesis of benzopyrans [J]. *Chem Commun*, 2009, 8(20):2878.

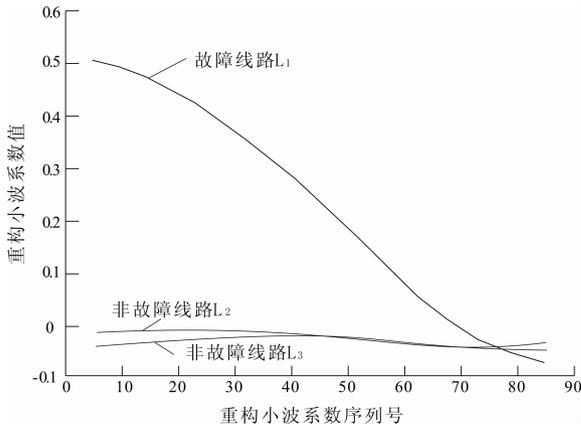


图 4 线路 L₁ 发生接地故障时波形图

表 2 综合算法下各线路的故障测度值及判断结果

故障初 相角/(°)	故障测度值			判定故 障线路	判定 结果
	L ₁	L ₂	L ₃		
0	0.914	0.037	0.044	L ₁	正确
30	0.932	0.103	0.021	L ₁	正确
60	0.953	0.020	0.032	L ₁	正确
90	0.985	0.001	0.002	L ₁	正确

5 结论

本文根据故障线路的零序导纳在高次谐波条件下明显区别于非故障线路的零序导纳这一特点,并结合小波包的分频特性及小故障角接地时零序电流的特性,提出一种基于改进零序导纳的小电流接地选线新方法.理论分析及实验结果表明,该方法充分利用了故障线路的暂态信息,比传统的基于某一个或几个频率分量的选线方法具有更高的灵敏度;同时,在选线算法的构造方面,综合利用了故

障零序电流小波包重构系数的幅值与零序导纳极性的信息,进一步提高了选线灵敏度.此外,该方法能克服电磁干扰进行选线,具有较强的抗干扰能力,另外该方法不受补偿度、过度电阻、故障地点和故障角度的影响,计算简单,可靠.

参考文献:

[1] 马珂,张保会.中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J].继电器,2003,31(5):65.

[2] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠,等.基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J].电力系统自动化,2003,27(9):48.

[3] 张艳霞,王清亮.应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J].电力系统自动化,2009,33(16):76.

[4] 程路,陈乔夫.小电流接地系统单相接地选线技术综述[J].电网技术,2009,33(18):219.

[5] 邢亚辉,王海军,吕艳萍.基于线路零序频率特性的小电流接地系统故障选线[J].电力自动化设备,2006,26(4):59.

[6] 唐秩,陈奎,陈庆,等.导纳互差之绝对值和的极大值法小电流接地选线研究[J].中国电机工程学报,2005,25(6):49.

[7] 朱珂,徐文远.基于增益阻抗理论的故障选线方法[J].电力自动化设备,2007,27(11):19.

[8] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等.小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):51.

[9] 戴剑锋,张艳霞.基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J].中国电机工程学报,2003,23(5):44.

[10] 张海申,何正友,张钧.谐振接地系统单相接地故障频谱特征分析[J].电力系统自动化,2012,36(6):79.

(上接第 10 页)

[33] Anderson J L, Armstrong D W. Immobilized ionic liquids as high-selectivity/high-temperature/high-stability gas chromatography stationary phases[J]. Anal Chem, 2005, 77(19):6453.

[34] Sheldrake G N, Schleck D. Dicationic molten salts (ionic liquids) as reusable media for the controlled pyrolysis of cellulose to anhydrosugars [J]. Green Chem, 2007, 9

(10):1044.

[35] Liang J H, Ren X Q, Wang J T, et al. Preparation of biodiesel by transesterification from cottonseed oil using the basic dication ionic liquids as catalysts [J]. J Fuel Chem Techn, 2010, 38(3):275.

[36] 赵振贵,李华,赵蕾.新型双核阳离子离子液体催化合成庚二酸二乙酯[J].精细石油化工,2011,28(2):72.