

机电-电磁暂态混合仿真在电网合环分析中的应用研究

胡立锦^{1,2}, 常喜强³, 周茂¹, 夏时宇¹, 张新燕², 姚秀萍³

(1. 重庆电力公司建设分公司, 重庆 410021; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;
3. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 电网带电合环是提高供电可靠性以及保障系统供电质量的一种重要方法。分析了纯机电暂态仿真和电磁暂态仿真的优缺点, 研究并提出了适合机电-电磁暂态混合仿真的网络等效方法和接口技术实现过程, 在此基础上, 提出基于 PSASP 平台的电网合环仿真计算系统设计思路。该系统运用机电暂态-电磁暂态混合仿真的方法来判断合环条件, 既可以反映特定系统中详细的电磁暂态变化过程, 又可仿真较大规模的电力系统, 无需等值且准确性较高。

关键词: 电网合环; 解决方案; 混合仿真

Abstract: Live loop closing in power grid is a vital way to improve the reliability of power distribution and ensure the quality of power supply. The advantages and disadvantages of the pure electromechanical transient simulation and the pure electromagnetic transient simulation are analyzed. The network equivalent method and the implementation process of interface technology suitable for electromechanical and electromagnetic transient hybrid simulation are studied and proposed. On this basis, the design ideas about simulation system of loop closing in power grid are put forward based on the PSASP platform. The system utilizes electromechanical-electromagnetic hybrid simulation to judge the condition of loop closing, which can not only reflect the electromagnetic transient state process but also can highly precisely simulate the large-scale system without equivalence.

Key words: loop closing in power grid; solution; hybrid simulation

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0001-06

0 引言

随着超高压、特高压骨干输电网络的不断建成和投运, 地区电网环状结构增多, 双电源或多电源供电越来越普遍, 通过合环操作实现不间断供电倒负荷和设备检修成为电网运行方式调整的一种必然趋势。然而, 合环操作过程中会造成馈线间断路器两侧电磁突变并产生冲击环流, 合环电流造成的系统热稳定影响、联络阻抗易突增造成的联络线暂态稳定极限影响、系统潮流分配改变、联锁切机切负荷等安全自动装置拒动误动等对电网安全稳定运行造成严重威胁。由此可见, 合环操作在保证电网供电可靠性的同时, 又因环流等因素严重威胁到电网的安全稳定运行, 采取合理的手段更加真实和具体地研究合环问题对电网运行方式制定等具有实际的参考价值。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767003, 50867004)

文献[5]基于 PSASP 计算合环潮流, 采用忽略发电机模型中 q 轴的 g 绕组的作用, 采用恒定 E_d' 的五阶模型, 励磁和调速系统仍采用综合程序提供的典型模型参数。文献[10]采用实时数据及离线数据相结合的方法计算合环潮流, 其核心是对于进行合环分析的局部网络的所有运行数据采用实时数据, 而对于该局部网络以外的网络则依据离线数据进行网络等值。文献[8]利用叠加原理, 根据戴维南等效定律, 将合环前后电网等效成在合环之前。文献[12]利用 BPA 等离线计算软件通过合环后潮流和合环前的电压回推得出戴维南等值阻抗。文献[9]提出了天津开发区电网快速环流计算软件, 该软件结合了实时和离线数据, 能对电网各种工况下的环流进行计算分析。在进行次同步振荡等问题研究时, 电磁暂态网络包含有发电机, 采用文献[1, 2]所提出的等值电路, 电磁暂态网络等值为时变负荷(恒阻抗负荷, 或恒阻抗、恒功率、恒电流等相配比), 或是文献[3]所提出的等值电路, 电磁暂态网

络等值为时变电流源,都不能准确地描述该电磁网络的特性。

下面在研究机电暂态仿真和电磁暂态仿真的基础上,提出 PSASP 平台下基于机电-电磁暂态混合仿真的方法来实现对电网合环分析研究,即对需要研究的合环局部电网进行电磁暂态仿真以反映真实的合环过程中电气量的变化规律,而对其余大电网系统采用基于潮流的不等值机电暂态仿真,通过接口程序实现整个仿真系统的同步对接运行和数据交互。混合仿真方法既保证了电磁暂态过程的精细化要求,同时又避免了系统侧等值而产生的模型误差,具有一定的参考价值和现实意义。

1 机电暂态仿真与电磁暂态仿真

如图1所示,在电力系统仿真时,整个网络可分为两大部分:机电暂态网络和电磁暂态网络(图中所示为一个接口点情况)。

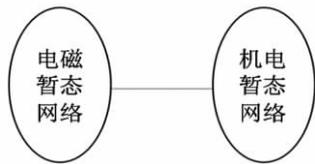


图1 网络分割示意图

常规仿真大多采用对非研究对象进行等值考虑:在进行机电暂态仿真研究时,将电磁暂态网络按戴维南电路等值,如图2(a)所示;在进行电磁暂态仿真研究时,将机电暂态网络进行诺顿电路等值,如图2(b)所示。

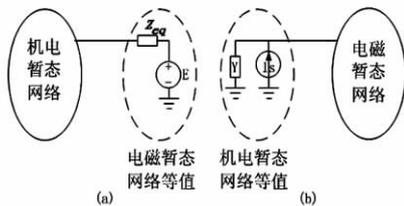


图2 网络等值图

但是单纯的机电暂态仿真和电磁暂态仿真面对更加多元化和复杂的现代电力系统网络表现出诸多不足:忽略电磁暂态网络进行机电暂态研究无法衡量柔性输电系统(FACTS)、超高压交直流输电系统以及风光储系统等不同环境和运行方式下对电网稳定性的影响。同时,以工频等值阻抗的形式表示机电暂态网络有其固有的局限性,其一,工频等值阻抗

并不能真实反映系统的谐波阻抗特性,对系统高频特性的描述并不准确;其二,以工频等值阻抗的形式表示机电暂态系统,有可能将系统中本来很小的特征谐波放大,有些系统中还有可能引起原系统并不存在的新的谐波。而进行电磁暂态研究时,若将机电暂态网络进行诺顿电路等值将进一步复杂网络的整体求解过程,加之电磁暂态研究仿真步长一般为50微秒级导致计算急剧膨胀,对仿真系统要求增加。

2 机电-电磁暂态混合仿真技术

混合仿真技术实现了在一次仿真过程中对大规模电网的机电暂态仿真和局部电网的电磁暂态仿真过程,对研究大电网环境下电力系统整体稳定性和局部动态特性有很强的现实意义和理论价值。

所提出的混合仿真过程实现原理如图3所示,以电磁暂态网络为参考点则机电暂态网络为一个戴维南电路,并向中间接口处发送阻抗和电势数据;而以机电暂态网络为参考点,电磁暂态网络为诺顿等效电路并向接口发送电压和电流数据。这种等值电路,对于网络为有源或无源网络情况都是适宜的。

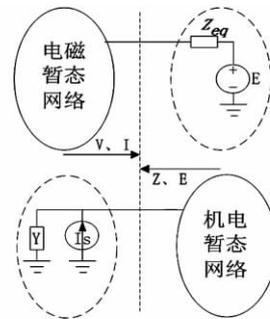


图3 混合仿真实现原理

为了提高混合仿真模拟精度,需要在原有对机电暂态系统进行工频等值的基础上添加频域等值功能。具体由以下几个步骤完成。

- 1) 对机电暂态系统进行频域扫描,计算出系统在接口点处的阻抗-频率特性关系。
- 2) 采用矢量匹配算法进行频率拟合,得到式(1)。

$$Z_{ep}(s) = d_0 + \frac{r_1}{s - a_1} + \frac{r_2}{s - a_2} + \dots + \frac{r_N}{s - a_N} \quad (1)$$

- 3) 根据式(1)形成如图4所示的电阻、电感、电容元件组成的串并联等值网络。

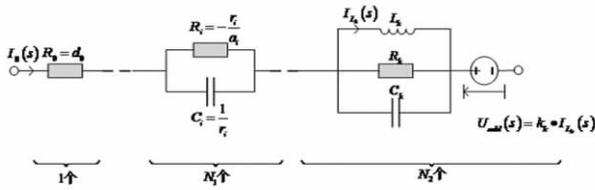


图4 等效阻抗网络

其中 $R_0 = d_0$ $R_k = \frac{-r_{kR}}{a_{kR}}$ $C_k = \frac{1}{r_i}$ $R_i = \frac{-r_i}{a_i}$,

$$k_k = \frac{-2a_{kR}Y_{kR} - 2a_{kI}r_{kI}}{a_{kR}^2 + a_{kI}^2} \quad C_k = \frac{1}{2r_{kR}} \quad J_k = \frac{2r_{kR}}{a_{kR}^2 + a_{kI}^2}$$

4) 将此电路作为机电暂态网络的等值电路,接入电磁暂态网络共同计算。

3 机电-电磁暂态混合仿真接口数据交互实现

完成混合仿真最关键的技术在于实现接口处数据的交换与共享。

3.1 接口数据交互时序

由于机电暂态网络计算的步长大,而电磁暂态网络计算的步长小,通常以机电暂态步长为交互单位进行。机电暂态网络和电磁暂态网络的数据交换可采用如下的时序(以机电暂态网络计算步长为 $DTP = 0.01\text{ s}$,电磁暂态网络计算步长为 $DTE = 0.001\text{ s}$ 为例)。

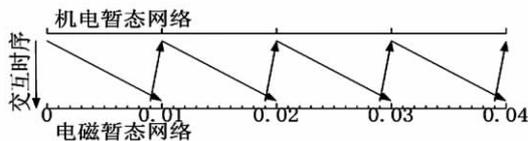


图5 接口数据交换时序

在 $t = N \times DTP$ 时刻两网络交换数据,其中电磁暂态网络接收的是机电暂态网络在 $t - DTP$ 时刻的值,机电暂态网络接收的是电磁暂态网络在 $t - DTE$ 时刻的值。

3.2 接口数据交互形式

机电暂态网络和电磁暂态网络的数据交换采用如下的数据形式:初始化时机电暂态网络向电磁暂态网络发送(传递)机电暂态网络的正、负、零序等值阻抗阵及正、负、零序等值电势的初始值;在每一机电暂态网络积分步长,机电暂态网络向电磁暂态网络发送(传递)边界点的正、负、零序等值电势,电磁暂态网络向机电暂态网络发送(传递)边界点的

正、负、零序电压和电流。在有故障或操作导致机电暂态网络结构发生变化时,机电暂态网络还需向电磁暂态网络发送(传递)机电暂态网络的正、负、零序等值阻抗阵。

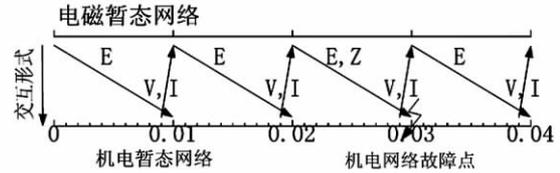


图6 接口数据交互形式

3.3 接口方法在仿真网络中的实现

机电暂态网络为三序相量网络,而电磁暂态网络为三相瞬时值网络,因此,需要对机电-电磁暂态接口数据进行序-相变换及瞬时量-相量变换,这部分工作由电磁暂态网络计算部分来完成,主要有:

(1) 获得机电暂态网络的三序戴维南等值电势和阻抗后,将其转换为三相瞬时值形式。

(2) 将边界点的三相电压、电流瞬时值转换为相量值,再进一步转换为三序相量值。①通过傅里叶变换,将电磁暂态网络边界点的A、B、C相注入电流瞬时值,转换成相量值;将电磁暂态网络边界点的A、B、C相注入电压瞬时值,转换成相量值。②将边界点的A、B、C相电流、电压(相量)转换为正、负、零序电流、电压(相量)。

其流程图如图7所示:接口模块首先接收机电暂态网络的边界点正、负、零序等值电势 E^i (相量形式, i 为序标),然后结合机电暂态网络的边界点正、负、零序等值阻抗 Z_{eq}^i ,将其变换成A、B、C相电流源并联A、B、C相导纳的形式;另一方面,接口模块还要将电磁网络边界点的A、B、C相注入电流及A、B、C相电压瞬时值 V_{abc} 、 J_{abc} ,通过快速傅里叶变换得到向量电压和电流 \vec{V} 、 \vec{I} 后再转换成正、负、零序相量值 E^i 、 i^i ,并发送给机电暂态网络。完成一次信息交互后,机电和电磁暂态网络继续进行下一个时步各自的计算。

3.4 不对称导纳的处理

若机电暂态网络中包括发电机,机电暂态网络的正、负、零序等值阻抗阵转换成A、B、C三相导纳阵后,会出现导纳阵不对称的情况。假设图8中区域A代表电磁暂态网络,区域B代表机电暂态等值网络;A与B之间的边界点为 m (这里 m 不仅仅代表一个边界点,而是代表边界点的集合),A与B之

间将形成如图8所示的 $[\alpha]$ 关联关系。

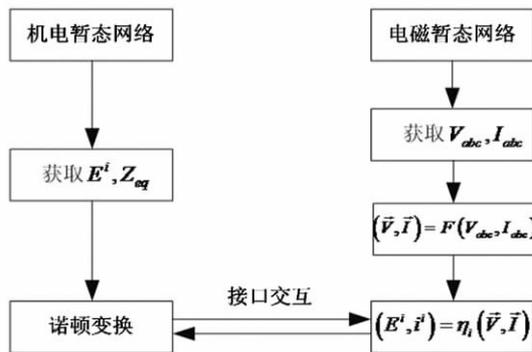


图7 接口模块交互流程

考虑到 q 为单位阵,可推得

$$(p^T Y_A^{-1} p + Y_B^{-1}) i_\alpha = Y_B^{-1} h_B - p^T Y_A^{-1} h_A \quad (2)$$

在仿真初始化时以及机电暂态网络或电磁暂态网络结构发生变化时刻进行LU分解式(2),其他时刻进行回代 i_α 计算各节点电压即可。

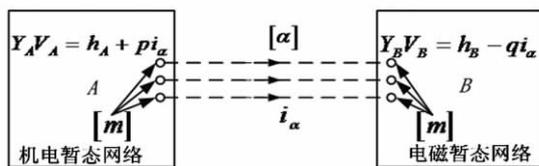


图8 机电-电磁接口示意图(节点分裂后)

4 机电-电磁暂态混合仿真在合环问题研究中的应用

4.1 合环问题的分类

根据不同的分类标准将合环问题按电压等级、合环模式以及电磁/非电磁情况进行分类。

(1) 按电压等级分类

目前,国内针对电网合环问题的研究多数着眼于配电网合环^[7-9],因为配电网一般采用环网设计、辐射运行的模式,即闭环结构,开环运行^[7],这种结构的电网合环问题出现的比较多。配电网按电压等级来分类,可分为高压配电网(35~110 kV)、中压配电网(6~20 kV)、低压配电网(380 V)等。

(2) 按合环模式分类

配电网合环问题一般可以分为以下3类^[14]。

①同一变电站同一区域的馈线合环,它们之间直接通过母联开关或联络开关进行合环操作,这类合环操作相对比较简单安全(直接合环)。

②同一变电站来自不同区域的馈线合环,合环母线的上一级电源来自不同的分区,它们之间直接通过母联开关或联络开关进行合环操作。

③不同变电站的馈线合环,合环母线属于不同变电站,馈线间通过联络开关进行合环操作^[7]。

(3) 其他分类

①电磁合环

从广义上说,凡是不同电压等级的网络相连,都可能出现电磁环网,电磁环网运行中,由于高一级电压线路断开造成负荷转移而造成的事故扩大,在国内外电力系统中已经出现过多次^[13-16],即使很强的电磁环网也有可能稳定问题。电磁合环问题的存在给现代电网的运行管理带来麻烦,也给电网的发展带来不确定因素。

②非电磁环网合环

非电磁环网合环是相同电压等级的电气元件组成的环网中出现的合环问题,此类合环问题在输电网和配电网中都曾出现,与高压输电网络所采用的多环路网络结构不同,配电网采用更多的是辐射型、环式等结构方式。正常时,联络开关断开;当其中一个站的出线开关需要检修或有其他突发事件时,先合上联络开关,再断开该站出线开关,通过另一个站的低压母线带上两端配电线路负荷,这就是配电网中的非电磁合环。

4.2 传统合环问题解决方案比较

传统合环问题解决方案大多基于经验估算、简单网络等值和机电暂态仿真等方法。由于电力系统本身的复杂性,调度运行人员根据自己的运行经验来判断系统是否可以合环操作容易引起连锁反应,导致系统大面积停电甚至系统解列,有较大的局限性。网络等值方法虽然在一定程度上解决了电网分析中计算速度与精度之间的矛盾,但同时牺牲了一定的系统动态特性,且该方法不能仿真合环操作对于整个系统稳定性的影响,因此不适用于电磁合环的模拟;未考虑外部网络模型,无法准确获得等值电势和等值阻抗,且不能用于大电网求解、冲击电流计算、谐波分析和三相负荷不对称的情形。而机电暂态仿真在时间刻度的描述上不够细致,并且由于其基于相量模型,不能够得到最恶劣的合环情况,并难以处理不对称负荷问题,不能计及合环操作时可能引入较多谐波分量,以及难以处理三相负荷不对称的情形。

4.3 基于 PSASP 的机电 - 电磁暂态电网合环仿真计算系统

这里提出采用机电 - 电磁暂态混合仿真的方法对电网合环仿真问题进行研究,基于 PSASP 和 Windows 平台设计仿真计算系统,顾全了计算速度的同时也保证了计算精度。

(1) 系统概述与仿真流程

系统架构如图 9 所示。

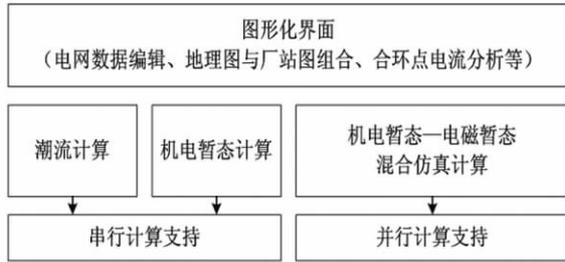


图 9 合环电流仿真计算系统架构图

(2) 功能模块

合环电流仿真计算系统主要包含了以下功能模块:图形化界面、合环潮流、合环点电磁暂态网络自动划分(用户不可见)、机电暂态模型到电磁暂态模型自动转换(用户不可见)、串行合环暂态仿真(机电暂态仿真)、并行合环暂态仿真(机电暂态-电磁暂态混合仿真)。通过混合仿真中电磁暂态开关统计仿真功能,能够分析并统计不同合环时刻对冲击电流幅值的影响。

(3) 合环潮流

合环潮流能够提供的计算结果包括常规潮流计算的结果,支路潮流(支路电流、输送功率)的对比查看,母线电压的对比查看以及合环潮流报告。报告中包括合环前母线电压差、合环前母线相角差、合环点电流值、过流保护定值、与保护定值的差值、与保护定值的差值(百分数)、合环操作是否可行等。

(4) 机电暂态仿真

合环机电暂态仿真能够提供的计算结果包括常规机电暂态仿真结果,自动监视合环点电流、输送功率以及合环计算报告。报告中包含合环点最大冲击电流值、合环点最大冲击电流百分数(相对于继电保护定值)、合环点稳态电流幅值、合环操作是否可行等。

(5) 机电 - 电磁暂态混合仿真

机电 - 电磁混合仿真流程图如图 10 所示,合环

混合仿真能够提供的计算结果包括以下几点:①合环点附近电压电流情况,包括合环点两侧合环前后的三相电流波形、三相电压波形以及三相电流幅值和三相电压幅值;②合环计算报告,其中包括合环点最大冲击电流值、合环点最大冲击电流百分数(相对于继电保护定值)、合环点稳态电流幅值以及合环操作是否可行;③提供开关统计功能,系统可以分析并统计不同合环时刻对冲击电流幅值的影响,给出最恶劣的合环情况。

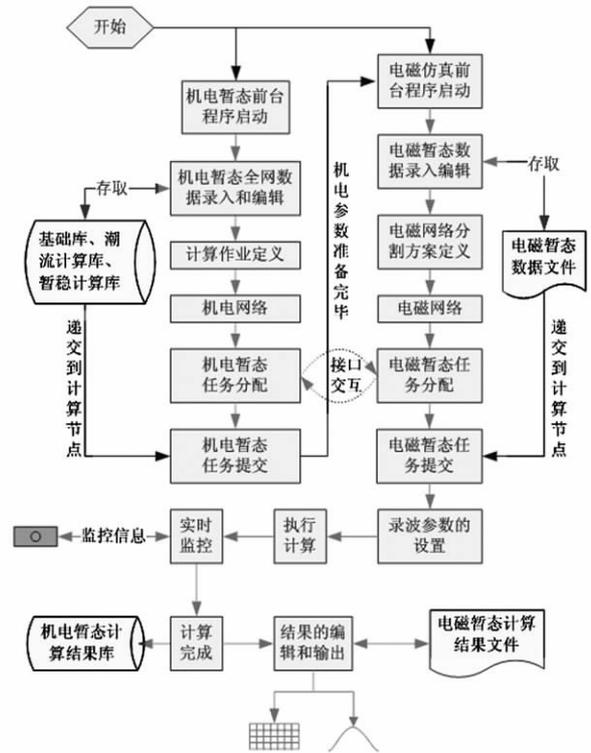


图 10 机电暂态、电磁暂态混合仿真流程

4.4 电网合环操作仿真计算系统的优势与不足

本系统相较其他合环计算仿真系统,有以下几点优势:①采用的数据与 PSASP 7.0 数据兼容,方便用户调用数据;②仿真规模大(系统规模超过 10 000 个节点)采用的数据样本多;③采用全网络数据进行求解,无需等值,计算精度高;④能够精确得到合环操作的稳态电流和冲击电流;⑤能够计及谐波分量,既提高了计算精度又方便用户分析原因;⑥能够模拟不对称负荷,增大了系统对不同负荷情况的适用性;⑦通过混合仿真中电磁暂态开关统计仿真功能,能够分析并统计不同合环时刻对冲击电流幅值的影响;⑧能够清晰表示合环路径,界面更加直观。系统的不足之处在于该离线系统涉及到数据的维护。

5 结 语

电力系统环网运行势必产生合环问题,而随着电力系统的发展,城市电网传输的功率迅速增长,城市电网必须增建更高电压等级的送电线路,电磁环网的出现不可避免,带来的电磁合环问题则更加严重。电网合环后的稳态电流计算和合环冲击电流的计算都需要采用仿真软件或者潮流分析来实现,现有的仿真软件有些是应用于区域电网的,有些无法实现实时在线仿真,数据维护量比较大,计算速度和算法上也还有很多不尽人意的地方。于是提出了基于电磁暂态-机电暂态混合仿真方法的电网合环操作仿真计算系统设计思路,它基于 Windows 平台开发,是基于普通 PC 机的离线分析工具。既可以反映特定系统中详细的电磁暂态变化过程,又可仿真较大规模的电力系统,无需等值且准确性较高。

参考文献

[1] 廖伟. 10 kV 配电网合环操作研究[J]. 贵州电力技术, 2001, 13(4): 33-36.

[2] 夏翔, 熊军, 胡列翔. 地区电网的合环潮流分析与控制[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 33-37.

[3] 曹亮, 孔峰, 陈昆薇. 一种配电网的实用潮流算法[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 58-60.

[4] 潘炜, 刘文颖, 杨以涵, 等. 电磁环网条件下西北 750 kV 电网运行方式的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 33-37.

[5] 程林. 电磁环网解合环与控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.

[6] 葛少云, 李晓明. 基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 124-127.

[7] Cheng C S, Shirmohammadi D. A Three-phase Power-Flow Method for Real-time Distribution System Analysis[J]. IEEE Transactions on Power System, 1995, 10(2): 671-679.

[8] 胡立锦, 张新燕, 刘东强, 等. 备自投含风电时和常规能源不同备自投的考虑[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 120-124.

[9] 强兴华. 地区电网合环操作的潮流近似计算[J]. 江苏机电工程, 2002, 10(21): 39-40.

[10] 叶剑, 陶玉华. 基于开口电压法的手工潮流计算方法[J]. 上海电力, 2010(1): 52-55.

[11] 张耀先. 天津开发区电网快速合环计算探讨[J]. 天津科技, 2009(3): 69-71.

[12] 夏翔, 周昱甬, 邱伟成. 地区弱电磁环网合环潮流探讨[J]. 继电器, 2004, 32(23): 28-31.

[13] 王庆, 应庆强, 摆存曦, 等. 银川地区 10 kV 配电网合环电流及计算方法的研究[J]. 陕西电力, 2007, 35(2): 41-44.

[14] 冯静. 鹤壁配电网合环电流计算、分析及决策系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.

[15] 冯静, 张建华, 刘若溪. 基于 PSCAD 的配网合环电流分析[J]. 现代电力, 2009, 26(3): 41-44.

[16] 陈霄, 王磊, 李扬. 配电网合环冲击电流的分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 40-42.

[17] 付轲, 蔡泽祥, 邱建, 等. 10 kV 电网电磁合环操作安全性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(4): 71-76.

[18] 张祖平, 范明天, 周莉梅. 城市电网电磁环网的解环问题研究[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 42-44.

[19] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 31(15): 61-65.

[20] 朱晓荣, 赵猛, 王毅. 双馈感应风力发电机组复合频率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 20-29.

[21] 程航, 曹五顺, 周明星. 不对称电网电压条件下直驱永磁风力发电机组并网逆变器的双电流闭环控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 66-72.

作者简介:

胡立锦(1986), 男, 硕士, 主要从事电力系统安全控制分析方面的研究;

常喜强(1978), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统安全稳定分析工作;

周茂(1977), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电规划与设计;

夏时宇(1978), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电规划与设计;

张新燕(1964), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为风力机控制、电气系统优化设计。

(收稿日期: 2012-10-16)