

基于频率差变化率的快速低频减载方法

低频减载是现代电力系统中广泛采用的一种制止系统频率快速下降,阻止系统频率崩溃的有效措施,是电力系统安全稳定运行的第三道防线。传统低频减载方法中频率低于整定值时起动减载装置,易错过最佳切负荷时间,引起事故的扩大。提出一种基于频率差变化率的快速低频减载方法,重点是对动作时间的选择,可快速起动减载装置,在尽可能短的短时间内阻止系统频率下降。详细介绍了方法的原理,并针对某一实际系统利用BPA软件建立模型进行仿真计算,通过与传统方法比较,证实了所提方法的有效性。

李 霞 李岩松 张泽锋/华北电力大学电气与电子工程学院
陶向宇/中国电力科学研究院

0 引言

低频减载是指当电力系统出现较大功率缺额时,响应于系统频率而起动并切除部分负荷,以维持系统有功功率平衡,并防止系统频率崩溃的一种有效的频率控制手段^[1]。低频减载是系统频率调节的最后一道防线。好的低频减载方法对维持系统安全、稳定和经济运行起着至关重要的作用^[2-3]。

目前主要的低频减载方法包括:传统方法、半适应方法、自适应方法以及计算机辅助算法^[4-6]。传统方法整定计算和判据均简单,在工程中运用最广泛,但无针对性,准确性不高,且易错过最佳切负荷时间。自适应和半适应方法都是通过频率变化率与有功功率缺额之间的定量关系来确定系统的切负荷量。半适应方法在首轮切除大量负荷,之后按照传统方法切负荷。在功率缺额较小时,效果良好^[7]。但在发生严重故障时,

其动作曲线与传统方法基本相同,性能没有明显改善。自适应方法是每一轮都按照功率缺额百分比切除负荷,受功率缺额影响小,但其设定为系统频率低于某一整定值时起动第一轮,导致起动时间较长,容易引起事故的扩大。计算机辅助算法是采用相应的算法,在发生故障后选取最优减负荷方案,主要针对减负荷量和减负荷点,主要包括遗传算法、神经网络和模糊理论等。此外,国内外学者还提出许多新型方法^[8-9]。

电力系统低频减载方法的核心包括切负荷量、切负荷点以及动作时间的选择^[10-11]。本文提出了一种基于频率差变化率的低频减载方法,并讨论了对动作时间的选择,根据频率曲线的变化率判断电力系统是否需要起动减载装置。若满足低频减载的条件,延时0.5 s起动减载装置,提前快速按比例切除负荷。与传统方法相比,本文提出的方法在故障发生后不需要等待较长的过渡时间,提前快速切负荷,可有效防止事故的扩大,有助于电力系统安全稳定运行。利用BPA软件对某实际系统建立模型并进行仿真计算,结果表明,与传统的低频减载方法相比,该方法可以简单快速地确定系统的实际功率缺额,并可在极短的时间内起动减载装置切除故障,大大缩短过渡时间。该方法简单准确,在电力系统在线监测中有着应用前景。

1 低频减载方法的设计

1.1 低频减载理论基础

电力系统的频率变化与其有功功率



李 霞/硕士研究生

关键词/Keywords

低频减载 ·
动态频率 ·
频率差变化率 ·
惯性时间常数 ·

国家自然科学基金资助项目(51277066)。

缺额有密切的联系。当系统功率缺额较大时,即使系统中的所有发电机满发,系统频率仍无法维持稳定,此时就需要起动低频减载装置^[12]。

电力系统典型的一阶惯性环节微分方程如下

$$T \frac{d\Delta f_*}{dt} + \Delta f_* = \frac{\Delta P_{L*}}{K_{L*}} \quad (1)$$

式中, T 为系统频率下降过程的时间常数; Δf_* 为系统频率变化值; ΔP_{L*} 为系统有功缺额,均为标么值,下同; K_{L*} 为负荷调节系数; t 为时间。

根据式(1),可得到频率变化量为

$$\Delta f_* = \frac{\Delta P_{L*}}{D} \left(1 - e^{-\frac{D}{T_s} t} \right) \quad (2)$$

式中, D 为系统总阻尼系数; T_s 为系统等效惯性时间常数,一般取10~15 s,系统的惯性时间常数通常为已知量,可通过试验方式获取^[13],且在大系统中,发电机引起的惯性时间常数变化通常可以忽略^[14]。

对式(2)求导,可得

$$\left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t \rightarrow 0} = \frac{50\Delta P_{L*}}{T_s} \quad (3)$$

由式(2)可以看出:系统在扰动初始瞬间的频率差变化率最大,与系统的惯性时间常数 T_s 、有功功率缺额 P_{L*} 满足定量关系,如式(3)所示。

因此,本文定义 K_{ROCOF} 表示系统的Rate Of Change Of Frequency (ROCOF)值,即

$$K_{ROCOF} = \left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t \rightarrow 0} \quad (4)$$

电力系统中的有功缺额越大,频率下降越快,最终频率值也越低^[15-18]。计算频率-时间曲线在扰动初始阶段的斜率,可定性分析系统的功率缺额大小,判断系统是否需要起动低频减载装置。根据式(3),若测得 K_{ROCOF} ,即可算出此时系统的功率缺额,可快速准确地确定切负荷量。

1.2 基于频率差变化率的快速低频减载方法

当系统出现较大功率缺额时,要求电力系统动作迅速,尽可能快速地起动低频减载装置切除负荷,在最短时间内阻止频率的下降^[15]。越早切除负荷,越有利于延缓频率的下降,有助于频率

的快速恢复。

由频率-时间曲线可以得到,当频率进入稳定下降阶段时,功率缺额越大,对应的 K_{ROCOF} 的绝对值也越大。因此对于某一特定系统可先通过调整潮流得到不同功率缺额下对应的频率曲线,得到最终频率差值为1 Hz的曲线,即最终频率降为49 Hz的曲线(传统减载装置第一轮起动频率一般设为49 Hz,也可以根据实际系统调整该频率值),求得该曲线在故障瞬间的斜率,记为 k_0 ,作为基准值,并设此时的功率缺额为 ΔP_{L0} ,即

$$k_0 = \left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{\Delta f = -1} \quad (5)$$

若检测到某一故障下频率曲线的斜率为 K_{ROCOF} ,当 $|K_{ROCOF}| < |k_0|$ 时,则表明系统稳定后最终频率值大于49 Hz,此时不需要起动低频减载装置;当 $|K_{ROCOF}| > |k_0|$ 时,系统最大频率偏差大于1 Hz,即表明最终频率会降低到49 Hz以下,此时应在故障后0.5 s时快速起动低频减载装置。即系统中起动低频减载装置的判据为:某一故障下频率曲线的斜率 K_{ROCOF} 的绝对值大于系统设定的基准值 k_0 的绝对值。

与传统方法相比,该方法最大的优势在于系统不需要等到频率值降低到49 Hz时再起动减载装置,因此系统低频减载动作时间可以有效提前,有助于防止事故恶化,提高电力系统稳定性。此外,根据系统频差率变化率与功率缺额的定量关系即可确定系统的实际功率缺额。

由于考虑到发生故障后电压的急剧下降有可能会使频率继电器误动作,所以一般采取0.1~0.2 s的延时,躲过暂态过程可能出现的误动作。另外,需要考虑电力系统中起动旋转备用所需要的时间延迟,以及开关的动作时间等约束条件,因此可以选择0.5 s延时起到低频减载装置。

综上,当电力系统发生故障时,首先判断频率曲线的斜率 K_{ROCOF} 是否满足 $|K_{ROCOF}| > |k_0|$,即功率缺额是否大于 ΔP_{L0} ,如果满足,即可在故障后延时0.5 s起到低频减载装置,以便于有效地延缓系统频率的下降。该减载方法的关键之处在于通过故障后频率-时间曲线的斜率 K_{ROCOF} 与标准值 k_0 的比较,

即可定性判断出最终频率值是否会低于49 Hz,从而确定是否需要启动低频减载装置。由于这一系列判断都是在故障发生后且系统频率降低到49 Hz之前完成,整个过程需要的时间较短,在频率还未大幅度降低之前起用低频减载装置,这对延缓频率下降十分有效。

1.3 低频减载方法的整体流程

该低频减载方法的整体思路:首先计算故障 K_{ROCOF} ,并与该系统的基准值 k_0 作比较,快速判断系统是否需要启动低频减载装置。根据系统频率变化率与功率缺额的定量关系,在极短的时间内计算出系统总的功率缺额,做出快速响应,提高了电力系统稳定性。该方法实现的流程如图1所示。

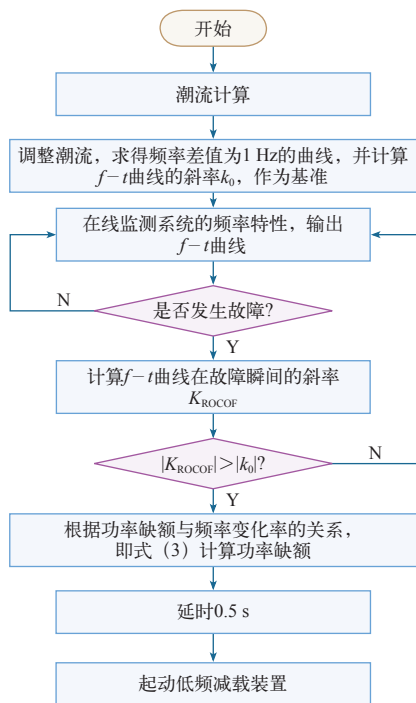


图1 低频减载方法的流程图

2 算例分析

所研究的实际电力系统是一个相对独立的系统,正常运行方式下通过三回500 kV高压输电线路与外界系统相连,当三回线路因故障断开时,该电网形成孤岛,该孤岛的总装机容量约为1 226 kW,该仿真系统简单示意图如图2所示。如果发生与外界系统三回联络线全部断开的重

大事故时,无论在何种运行方式下,仅靠系统内部自身的频率调节作用是无法在扰动后维持系统频率在安全运行范围之内的,会导致该电网频率急剧下降。因此,正确整定该电网的低频减载方法,对保证电网的安全稳定运行具有重要意义,同时也可以尽量避免负荷损失,产生可观的经济效益和社会效益。

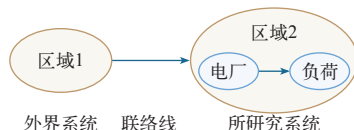


图2 仿真系统简单示意图

2.1 仿真模型

采用BPA软件建立该系统模型,水轮发电机采用不考虑阻尼绕组的双轴模型(MF卡),汽轮发电机采用考虑4个绕组的隐极发电机模型(MG卡);发电机的控制系统采用GS型(火电)和GH型(水电)模型调速器和FV型励磁器模型。

负荷总量为1 503.8 kW,负荷为电动机(MJ卡)与恒阻抗的综合动态负荷模型,在该建模中该系统的分区号为1W、2P-3C,其中在1W、2P-2Z区域中包括50%的感应电动机负荷和50%恒阻抗负荷,3C区域包括60%的感应电动机负荷以及40%的恒阻抗负荷。

2.2 仿真分析

在该系统不同的运行方式下,1 s时做断线故障,每次都全部断开该系统与外界系统之间的三条联络线,使该系统形成孤岛,观察该独立系统在不同功率缺额下的频率特性。

2.2.1 不同功率缺额下的频率特性

通过调整潮流得到不同功率缺额下的频率变化曲线,如图3所示,其中每条曲线的名称表示对应的功率缺额百分比;纵坐标表示频率差值,即系统频率与额定频率(50 Hz)的差。观察该独立系统的频率特性,由图3可知,系统在1 s时刻发生故障。在故障发生的瞬间,系统有功功率缺额越大,频率-时间曲线斜率绝对值越大;并且在故障后,系统有功缺额越大,频率降落越快,最大频率偏移量越大。

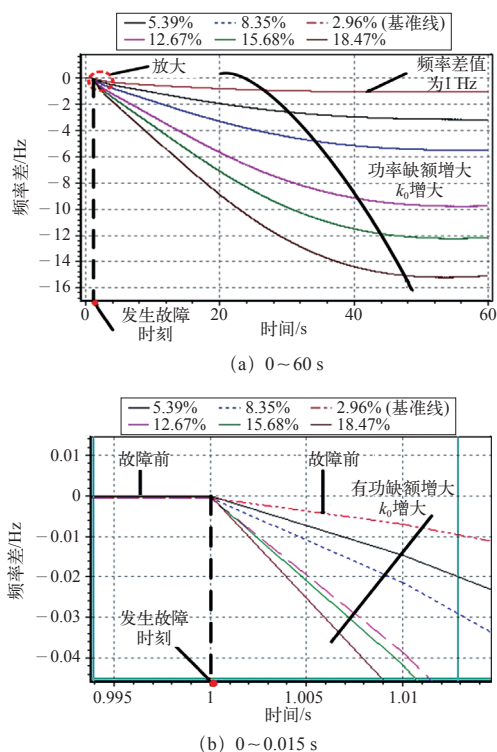


图3 不同功率缺额下的 $\Delta f-t$ 曲线

在频率紧急控制装置中, df/dt 一般以微小时间段内频率的变化来测量, 即

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{f(k) - f(k - \Delta t)}{\Delta t} \quad (6)$$

式中, $f(k)$ 为 k 时刻的系统频率值; $f(k - \Delta t)$ 为 $k - \Delta t$ 时刻的系统频率值。在仿真模型中选取 $\Delta t = 0.5$ s。

根据图3曲线可知, 当该系统的功率缺额为2.96%时, 频率降低约为1 Hz, 可作为该低频减载方法的基准线。此外, 该基准线当 $t = 1.5$ s时, 系统的频率差为 $\Delta f = -0.062 73$ Hz, 该曲线1~1.5 s内的频率平均变化率为 $k_0 = -0.125 46$, 对应的功率缺额为 $\Delta P_{L0} = 2.96\%$ 。

系统运行时在线实时检测该系统的频率曲线, 当发生故障后频率曲线的斜率 K_{ROCOF} 满足 $|K_{ROCOF}| > |k_0|$ 时, 系统最大频率偏差大于1 Hz, 即最终频率会降低到49 Hz以下, 此时就可在故障后0.5 s时启动低频减载装置。

2.2.2 频率差变化率 K_{ROCOF} 与功率缺额 ΔP_{L*} 的定量关系

通过分析上述不同功率缺额下的频率-时间曲线, 根据式(6)计算故障发生后0.5 s内频率差

的平均变化率 K_{ROCOF} , 并得到与功率缺额 ΔP_{L*} 的对应关系, 如下表所示。

表 1~1.5 s内频率差平均变化率与功率缺额的关系

序号	频率差变化率 K_{ROCOF}	功率缺额 $\Delta P_{L*}(\%)$
1	-0.14	3.39
2	-0.18	4.72
3	-0.22	5.39
4	-0.25	6.75
5	-0.27	7.45
6	-0.33	8.35
7	-0.53	13.42
8	-0.61	15.68
9	-0.69	17.68
10	-0.72	18.47
11	-0.84	21.17
12	-0.87	21.87
13	-0.94	23.20

得到线性关系

$$\Delta P_L = -0.25 \frac{d\Delta f}{dt} + 0.002 6 \quad (7)$$

考虑到计算过程中的误差, 且0.002 6很小, 可忽略, 因此该直线可简化近似为一条过原点的直线, 即

$$\Delta P_L = -0.25 \frac{d\Delta f}{dt} \quad (8)$$

这样就可以通过在线监测频率变化, 首先确定需要切负荷后, 根据式(8)就可以计算出对应的功率缺额, 快速确定切负荷量。

2.3 针对该实际系统的低频减载方法

在线监测该系统的频率特性, 当判断出该系统发生故障时, 首先确定是否需要启动减载装置。

计算该系统频率差-时间曲线在1~1.5 s内的平均变化率 K_{ROCOF} , 并与基准值 $k_0 = -0.125 46$ 比较, 当满足 $|K_{ROCOF}| > |k_0|$ 时, 功率缺额大于2.96%, 最大频率偏移量大于1 Hz, 此时则需要启动低频减载装置。选择故障后0.5 s启动低频减载装置切除部分负荷, 即在频率降低到49 Hz之前, 提前快速切除负荷, 有助于抑制系统频率的大幅降低。根据式(8)可求得故障后0.5 s时的功率缺额, 按一定的比例确定切负荷量。

本文所提出的快速低频减载方法，重点关注对动作时间的选择，根据频率曲线的变化率 K_{ROCOF} 判断是否起动减载装置，并延时0.5 s提前快速切除负荷，相比较传统方法，本文所提出的方法大大缩短了过渡时间，可有效阻止系统频率的降低。

2.4 低频减载方法的有效性验证

采用本文所提的快速低频减载方法，在不同的功率缺额下切负荷，并与传统低频减载方法进行比较，得到系统频率变化结果如图4所示。

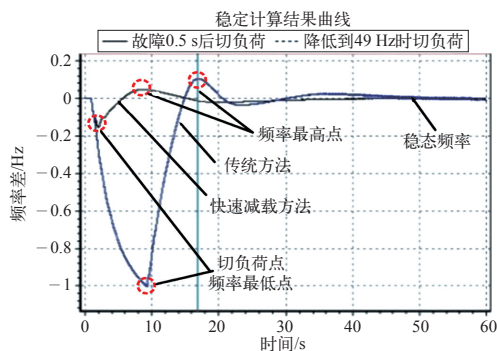


图4 功率缺额为6.5%时的频率响应

图4为功率缺额为6.5%时两种低频减载方法的比较，本文所提快速低频减载方法为故障后0.5 s时切负荷，传统方法为频率值降低到49 Hz时切负荷。在故障后0.5 s内两种低频减载方法均未采取任何措施，因此两种方法在故障后0.5 s内频率-时间曲线重合。

根据计算可知，该系统满足 $|K_{ROCOF}| > |k_0|$ 时，功率缺额大于2.96%，最大频率偏移量大于1 Hz，此时则需要起动低频减载装置，在故障后0.5 s时，由于快速减载方法开始切负荷，两曲线发生不同的变化。

快速减载方法在0.5 s切除部分负荷，频率迅速上升，在较短时间内迅速恢复到额定频率值附近；且在整个过程中系统的最低频率高于49.8 Hz，且远远大于传统方法中的最低频率49 Hz，满足电力系统要求的电能质量，不影响系统中其他设备的正常运行。传统减载方法中，频率则继续下降，经过较长的过渡时间后，直到频率降低到49 Hz时开始起动减载装置切负荷，此时频率值太低，不满足系统电能质量的要求，不利于系统的稳定

运行。

此外，相比于传统的低频减载方法，本文中所提的快速减载方法，没有超调现象出现，调整时间也要优于传统减载方法。由于在该仿真中，两种方法中选择切除相同比例的负荷量，系统稳态频率几乎重合，均接近50 Hz，满足系统要求。

当功率缺额较大时，如图5所示，该曲线对应的功率缺额为13.42%。由于功率缺额较大，频率降低到49 Hz所用的时间较短，因此这两种方法都能迅速地动作，及时地通过切除负荷使频率恢复至允许范围内。

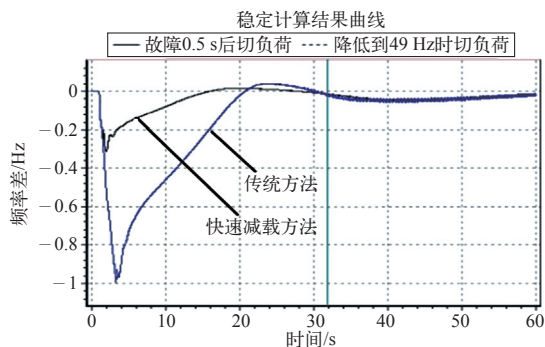


图5 功率缺额为13.42%时的频率响应

由图5可以看出，当系统功率缺额较大时，两种减载方法的差异变得不明显。但仍可以看出，传统方法和快速减载方法中的稳态频率几乎重合。两种方法的过渡时间相差不大，但快速减载方法中的切除时间仍小于传统方法，且系统最低频率高于传统方法。两种方法中，经过暂态过程后系统频率迅速上升至额定频率，但是快速减载方法中系统频率可更快恢复稳定，系统的过渡时间较传统方法更短。两种方法中是否发生超调需要考虑切负荷量以及系统的调速系统。因此相比而言，快速减载方法的总体性能更优。

根据上述两种减载方法的比较可得，当功率缺额较小时，本文中所提出的快速低频减载方法效果好，其优势更明显；功率缺额较大时，该方案的频率稳定性较好，因此本文提出的方法总体性能更优，且该总体优势取决于功率缺额的大小。该方法可在较短的时间内确定系统实际的有功缺额，并起动装置切除负荷，不至于使频率值太低，有利于系统的频率稳定。

3 结束语

根据上述分析,可得到如下结论:当系统发生故障后,功率缺额越大,频率差-时间曲线斜率越小,并且频率降落越快,最大频率偏移量越大。对应不同的功率缺额,本文所提的快速低频减载方法比传统方法需要的调整时间短,可以在短时间内切除故障,更有利于延缓频率的下降,使频率尽可能快地恢复。

本文提出的方法满足低频减载快速性的要求,关键之处在于准确预测出故障后的最终频率值与整定值的大小关系,能在故障后很短的时间内切除部分负荷,扭转系统频率下降的趋势,有助于防止事故的恶化、崩溃。并结合系统的动态频率特性,具有针对性,可以更好地适应系统的动态变化过程,有助于改善系统的切负荷效果。且该方法简单准确,在电力系统在线监测中有着较好的应用前景。

考虑到测量工具的准确性,以及系统等效惯性时间常数在故障发生前后等效为恒定值,这些误差最终会体现在有功缺额的估算上,因此需要作进一步的研究。

参考文献

- [1] 李岩松. 电力系统自动化 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 赵强, 刘肇旭, 张丽. 对中国低频减载方案制定中若干问题的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (11): 48-53.
- [3] 袁季修. 防止电力系统频率崩溃的紧急控制 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (4): 1-4.
- [4] 陈俊山, 洪兰秀, 郑志远. 电力系统低频减载研究与应用发展 [J]. 继电器, 2007, 35 (14): 79-82.
- [5] 杨博, 解大, 陈陈, 等. 电力系统低频减载的现状和应用 [J]. 华东电力, 2002, 30 (9): 14-18, 72.
- [6] Arulampalam, Atputharajah, Tapan Kumar Saha. Fast and adaptive under frequency load shedding and restoration technique using rate of change of frequency to prevent blackouts [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. IEEE, 2010.
- [7] 常喜强, 何恒靖, 解大, 等. 计及频率差变化率的低频减载方案的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (4): 68-73.
- [8] 王葵, 潘贞存. 一种新型低频减载方案的研究 [J]. 电网技术, 2001, 25 (12): 31-33.
- [9] 何雪峰, 高鹏, 王超, 等. 考虑负荷频率刚性特征的一种新型低频减载实现方案 [J]. 华东电力, 2007, 35 (10): 34-37.
- [10] 熊小伏, 周永忠, 周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (19): 48-51.
- [11] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (11): 169-176.
- [12] 王聪. 基于功率缺额追踪的低频减载策略研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2013.
- [13] 沈臣, 顾伟, 吴志. 孤岛模式下的微电网低频减载策略分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (9): 47-52.
- [14] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (3): 29-33, 52.
- [15] 张培高, 李兴源, 李政. 孤网频率稳定与控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (15): 143-149, 155.
- [16] 张健铭, 毕天姝, 刘辉, 等. 孤网运行与频率稳定研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (11): 149-154.
- [17] Laghari J A, Mokhlis H, Karimi M, et al. An intelligent under frequency load shedding scheme for islanded distribution network [C]. 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia, 2012: 40-45.
- [18] 蔡国伟, 孙正龙, 王雨薇, 等. 基于改进频率响应模型的低频减载方案优化 [J]. 电网技术, 2013 (11): 3131-3136.

(收稿日期: 2016-03-02) **EA**