

## 计及 UPFC 的 220 kV 分区电网运行可靠性研究

王薪苹<sup>1</sup>, 李群<sup>2</sup>, 刘建坤<sup>2</sup>, 臧海祥<sup>1</sup>, 孙国强<sup>1</sup>, 卫志农<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**随着电网互联规模的不断扩大,电网的电力电子化不断增强,给电网的运行可靠性带来了新的挑战。统一潮流控制器(UPFC)作为调节潮流能力最强的柔性交流输电(FACTS)设备,我国已经实现其自主设计、研发并成功投运于南京西环网。通过建立含 UPFC 的运行可靠性模型,并对南京西环网进行运行可靠性分析以及效益评估。算例结果表明,UPFC 能够有效提高区域电网的运行可靠性,具有可观的经济效益。

**关键词:**运行可靠性;统一潮流控制器;效益评估

**中图分类号:** TM762

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)01-0039-04

作为目前通用性最好的柔性交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)<sup>[1]</sup>设备,统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)是为了实现交流输电系统的实时控制和动态补偿而发展出来的,它兼备静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)和静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)的特点,在潮流控制上具有较大的优势,能够精确调节有功和无功功率,优化线路传输功率及网路潮流分布,同时还具有提高系统稳定性<sup>[2]</sup>、阻尼系统振荡的能力。

目前,UPFC 的示范工程已经在南京西环网成功投运<sup>[3]</sup>,其对电网的运行可靠性的影响有待分析。基于此,本文通过建立计及 UPFC 的 220 kV 分区电网运行可靠性评估模型,对 UPFC 对电网可靠性的影响进行量化分析,并对其进行可靠性效益评估。

### 1 UPFC 稳态模型

UPFC 一般采用双电压源模型<sup>[4]</sup>,其模型结构如图 1 所示,其主要由并联可控电压源  $\dot{V}_E$ 、阻抗  $Z_E$  和串联可控电压源  $\dot{V}_A$ 、阻抗  $Z_B$  组成。假设 UPFC 安装在线路  $s-m$  的  $s$  端,可以通过在 UPFC 末端增加一个节点  $r$ ,使得 UPFC 成为独立支路,然后参与计算。通过合理控制串、并联侧可控电压源幅值和相角,灵活地实现 UPFC 的电压调节、线路串联补偿以及移相等多种功能。

在具体计算过程中,可将 UPFC 对系统的影响

等效为对其所在支路两端节点的注入功率  $P_{sr} + jQ_{sr}$ 、 $P_{rs} + jQ_{rs}$ ,等效示意图如图 2 所示,等效注入功率可用式(1)表示:

$$\begin{cases} P_{sr} + jQ_{sr} = \dot{V}_s \dot{I}_s^* = \dot{V}_s (\dot{I}_E - \dot{I}_r)^* \\ P_{rs} + jQ_{rs} = \dot{V}_r \dot{I}_r^* \end{cases} \quad (1)$$

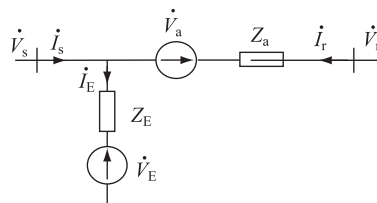


图 1 UPFC 的双电压源模型

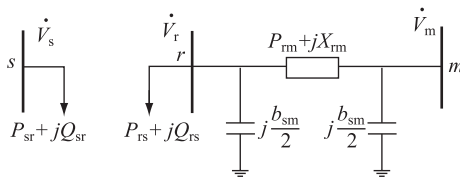


图 2 UPFC 支路等效示意图

### 2 计及 UPFC 的 220 kV 分区电网运行可靠性模型

220 kV 分区电网属于发输电系统范畴,其可靠性评估包括 4 个主要方面:确定元件失效模型和负荷模型,选择系统状态,识别并分析系统问题,以及进行可靠性指标计算,基本步骤如图 3 所示。

#### 2.1 基于实时运行条件的元件时变可靠性模型

本文主要从以下两方面考虑元件时变可靠性<sup>[5]</sup>:(1) 线路潮流增加会导致线路停运概率增大;(2) 当电压升高或降低到保护整定值时,发电机保护装置动作,并且随着电压越限程度的加深发电

收稿日期:2016-10-25;修回日期:2016-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51507052)

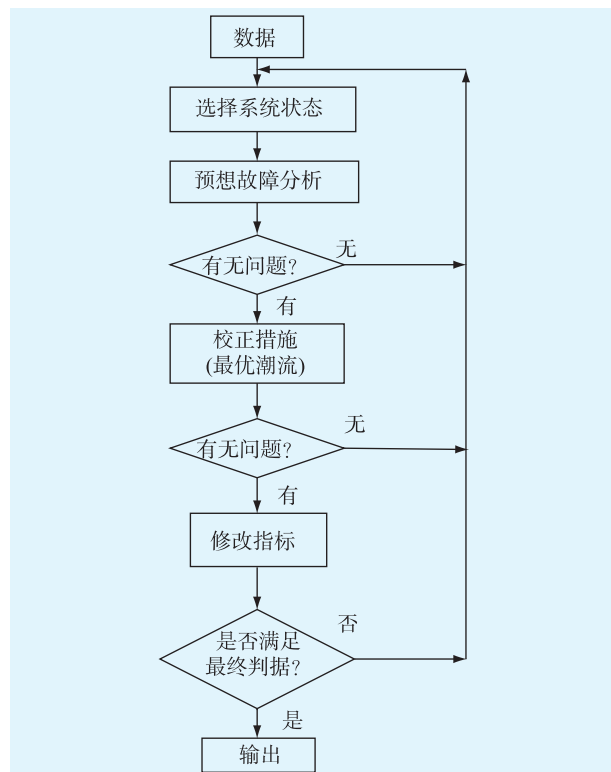


图3 发输电系统可靠性评估流程

机保护的动作时限减小,发电机跳闸退出运行的概率增大。

## 2.2 状态抽样法

状态抽样法又叫非序贯蒙特卡洛模拟法<sup>[6]</sup>,广泛用在电力系统可靠性评估中。该方法的依据是,一个系统状态是所有元件状态的组合,且每一元件状态可由对元件出现在该状态的概率进行抽样来确定。

每一元件可用一个在 $[0,1]$ 区间的均匀分布来模拟。假设每一元件有失效和工作2个状态,且元件失效是相互独立的。令 $s_i$ 代表元件 $i$ 的状态, $Q_i$ 代表其失效概率,则对元件 $i$ 产生一个在 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数 $R_i$ ,使

$$s_i = \begin{cases} 0 & \text{(工作状态) if } R_i > Q_i \\ 1 & \text{(失效状态) if } 0 \leq R_i \leq Q_i \end{cases} \quad (2)$$

具有 $N$ 个元件的系统状态由矢量 $s$ 表示:

$$s = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_N) \quad (3)$$

一个系统状态在抽样中被选定后,即进行系统分析以判断其是否是失效状态,如果是,则对该状态的风险指标函数进行估计。

当抽样的数量足够大时,系统状态 $s$ 的抽样频率可作为其概率的无偏估计,即:

$$P(s) = \frac{m(s)}{M} \quad (4)$$

式中: $M$ 是抽样数; $m(s)$ 是在抽样中系统状态 $s$ 出

现次数。

## 2.3 故障分析方法

采用基于交流潮流的灵敏度方法。研究一个输电系统中线路 $i-j$ 停运的情况,假设线路 $i-j$ 在其停运前两端的潮流是 $P_{ij} + jQ_{ij}$ 和 $P_{ji} + jQ_{ji}$ ,并假设停运前的母线 $i$ 和 $j$ 上有2个外加注入功率,用 $P_i + jQ_i$ 和 $P_j + jQ_j$ 表示。如果外加注入功率能够产生潮流增量,使系统的潮流与停运后状态的潮流相同,则这个外加注入功率完全与线路 $i-j$ 的停运等效。可以证明,线路 $i-j$ 的潮流和停运前状态的外加注入功率存在以下关系:

$$\begin{bmatrix} P_{ij} \\ Q_{ij} \\ P_{ji} \\ Q_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_j} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_j} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial P_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial Q_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial P_j} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial Q_j} \\ \frac{\partial P_{ji}}{\partial P_i} & \frac{\partial P_{ji}}{\partial Q_i} & \frac{\partial P_{ji}}{\partial P_j} & \frac{\partial P_{ji}}{\partial Q_j} \\ \frac{\partial Q_{ji}}{\partial P_i} & \frac{\partial Q_{ji}}{\partial Q_i} & \frac{\partial Q_{ji}}{\partial P_j} & \frac{\partial Q_{ji}}{\partial Q_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

在母线 $i$ 和 $j$ 的这一外加注入功率可通过求解方程组得出。然后可求解下式获得由线路 $i-j$ 停运引起的母线电压幅值增量和相角增量:

$$[J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = [\Delta I] \quad (6)$$

式中: $[J]$ 是停运前状态的潮流方程雅可比矩阵; $\Delta V/V$ 是电压幅值增量矢量,它的元素是 $\Delta V_i/V_i$ ; $[\Delta \delta]$ 是电压相角增量矢量,其元素是 $\delta_i$ , $[\Delta I]$ 定义如下:

$$[\Delta I] = [0, \dots, 0, \Delta P_i, 0, \dots, 0, \Delta P_j, 0, \dots, 0, \Delta Q_i, 0, \dots, 0, \Delta Q_j, 0, \dots, 0]^T \quad (7)$$

得到母线电压以后,即可计算线路 $i-j$ 停运后的线路潮流。

## 2.4 负荷削减的最优化模型

当停运引起系统问题时,通过专门的最优潮流(optimal power flow, OPF)模型<sup>[7]</sup>进行发电重新调度,以消除系统约束越限;同时尽可能避免负荷削减,或者在无法避免时使负荷削减最小。这个最优潮流模型的目标函数是负荷削减总量最小,最优解就是各母线上的负荷削减量。

基于交流潮流的最优潮流模型如下:

$$\min \sum_{i \in N_D} C_i \quad (8)$$

约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_i(V, \delta) - P_{Di} + C_i = 0 & i \in N_D \\ P_i(V, \delta) - P_{Di} + C_i = 0 & i \in N_D \\ Q_i(V, \delta) - Q_{Di} = 0 & i \in N_D \\ P_{Gi}^{\min} \leq P_i(V, \delta) \leq P_{Gi}^{\max} & i \in N_G \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_i(V, \delta) \leq Q_{Gi}^{\max} & i \in N_G \\ 0 \leq C_i \leq P_{Di} & i \in N_D \\ T_k(V, \delta) \leq T_k^{\max} & (k \in L) \\ V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} & (i \in N) \end{array} \right. \quad (9)$$

式中:  $P_i, Q_i$  分别是母线  $i$  的注入有功和注入无功;  $V$  和  $\delta$  分别是母线电压的幅值和相角矢量;  $V_i$  是  $V$  的元素;  $P_{Di}$  和  $Q_{Di}$  分别是母线  $i$  上的有功和无功负荷;  $C_i$  是母线  $i$  的负荷削减变量;  $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$  和  $Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$  分别是发电母线  $i$  上注入有功和注入无功的下限和上限;  $T_k$  是线路  $k$  上的潮流;  $T_k^{\max}$  是线路  $k$  的额定容量;  $V_i^{\min}, V_i^{\max}$  是母线  $i$  上电压幅值的下限和上限;  $N_D, N_G, N$  和  $L$  分别是系统中负荷母线、发电母线、所有母线、以及所有支路的集合。

### 3 可靠性效益分析模型

采用最小系统停电损失模型<sup>[8]</sup>评估计及 UPFC 的 220 kV 分区电网的运行可靠性, 直接评估可靠性的效益非常困难, 因此通常将不可靠成本, 即停电损失作为电力系统可靠性价值的间接度量。

#### 3.1 可靠性效益评估指标

期望停电损失 (EIC) 为:

$$EIC = W \times EENS \times f \quad (10)$$

式中:  $W$  为用户停电损失,  $\text{¥}/\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $EENS$  为期望负荷量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $f$  为故障频率。

#### 3.2 可靠性效益评估方法

采用最小系统停电损失模型, 该模型的目标是最小化系统停电损失, 并满足功率平衡、线路潮流和发电机出力不越线的约束。模型的切负荷策略是首先切除停电损失较低的负荷, 并考虑停电持续时间对负荷节点各类用户的停电损失的影响。最小系统停电损失模型描述如下。

目标函数:

$$\min \sum_{i \in N_D} \sum_{j \in N_{Ci}} W_{ij}(D_k) P_{Cij} \quad (11)$$

约束条件包括潮流方程:

$$P_G - P_D + P_C = B_0 \delta \quad (12)$$

有功平衡方程:

$$\sum_{i \in N_G} P_{Gi} + \sum_{i \in D} \sum_{j \in N_{Ci}} P_{Cij} = \sum_{i \in D} \sum_{j \in N_{Ci}} P_{Dij} \quad (13)$$

发电机出力约束:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i \in N_G \quad (14)$$

切负荷约束:

$$0 \leq P_{Cij} \leq P_{Dij} \quad i \in N_B, j \in N_{Ci} \quad (15)$$

线路潮流约束:

$$|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max} \quad i, j \in N_B \quad (16)$$

式中:  $D_k$  为系统状态的持续时间;  $W_{ij}(D_k)$  为母线  $i$  上第  $j$  类用户的停电损失函数;  $P_{Gi}$  为发电机的有功出力;  $P_{Dij}$  和  $P_{Cij}$  分别为母线  $i$  上第  $j$  类用户的有功负荷和负荷削减变量;  $P_{Gi}^{\min}$  和  $P_{Gi}^{\max}$  为发电机  $i$  的有功及无功出力极限;  $P_{ij}$  为支路  $i-j$  的有功功率潮流,  $P_{ij}^{\max}$  为支路的容量极限;  $N_B, N_G$  和  $N_D$  分别为所有母线、发电机和负荷节点集合;  $N_{Ci}$  为母线  $i$  上的各类用户的集合。

## 4 算例分析

### 4.1 运行可靠性分析

首先以标准可靠性测试系统 (RBTS)<sup>[9]</sup> 为例, 评估含 UPFC 系统的运行可靠性。其作用主要体现在改善系统的运行条件上, 其在运行可靠性评估中的作用主要体现在降低了部分线路的停运概率。以负荷削减量为可靠性评价指标, 测试系统的不含 UPFC 常规可靠性指标、含 UPFC 的常规可靠性指标、含 UPFC 的运行可靠性指标对比如图 4。

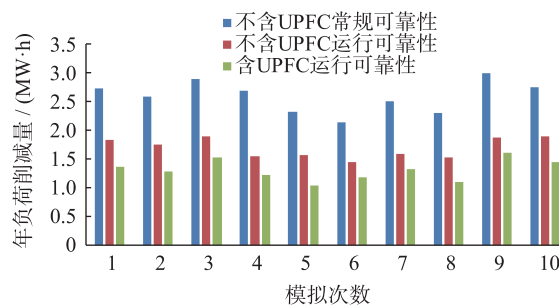


图 4 RBTS 系统测试结果

由图 4 可知, 经过 10 次重复评估, 含 UPFC 常规可靠性模型中, 负荷削减量降幅百分比平均达到 37.19%, 含 UPFC 运行可靠性模型中, 负荷削减量降幅百分比平均达到 45.91%, 这是由于在运行可靠性模型中, UPFC 使得线路潮流得到改善, 线路的故障率降低, 使得负荷削减量更低, 更加符合实际情况。

再以南京西环网作为研究对象, 该系统不含 UPFC 常规可靠性指标、含 UPFC 的常规可靠性指标、含 UPFC 的运行可靠性指标对比如图 5。

由图 5 可知, 经过 10 次重复评估, 含 UPFC 常规可靠性模型中, 负荷削减量降幅百分比平均达到 10.85%, 含 UPFC 运行可靠性模型中, 负荷削减量降幅百分比平均达到 15.45%, 这是由于在运行可

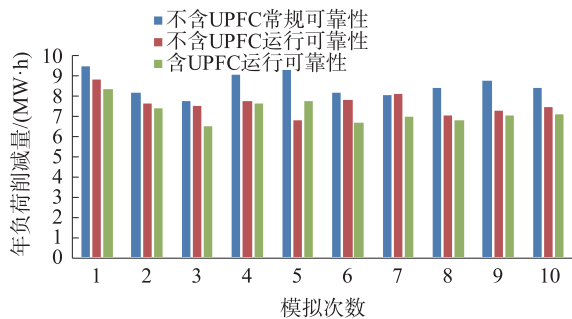


图5 南京西环网测试结果

可靠性模型中,UPFC 使得线路潮流得到改善后,线路的故障率降低,使得负荷削减量更低,更加符合实际情况。相比标准测试系统,该等值网络规模较大,UPFC 对提高系统可靠性的效果降低,这是由于此情景下 UPFC 的调节区域有限造成的。

#### 4.2 运行可靠性效益评估

以 RBTS 和南京西环网为算例进行效益评估。本文  $W$  取 2。RBTS 和南京西环网的运行可靠性评估中负荷损失对比如图 6 和图 7。

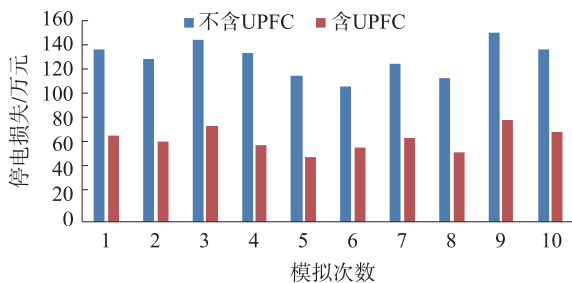


图6 RBTS 系统停电损失

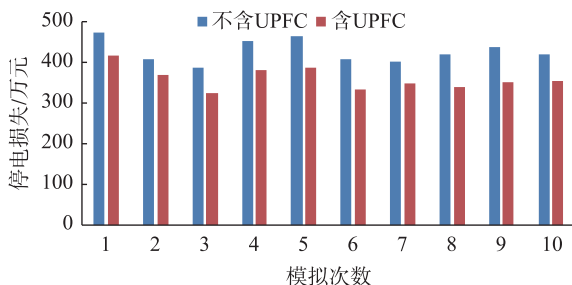


图7 南京等值网停电损失

算例表明,由于 UPFC 的引入,使得 RBTS 系统和南京西环网在负荷削减损失方面分别降低了 45.91% 和 15.49%,表明 UPFC 在提高系统可靠性效益方面具有较明显的作用。由于南京西环网的规模相比测试系统规模大,所以效果略差。随着网络规模的增大,通过合理的选址定容,可以更好地发挥 UPFC 在提高系统运行可靠性及其效益方面的作用。

## 5 结束语

本文通过建立计及 UPFC 的 220 kV 分区电网

运行可靠性评估模型,量化分析了 UPFC 对电网可靠性的影响,并对其进行可靠性效益评估,通过 RBTS 和南京西环网算例分析,得到以下结论:(1) 运行可靠性模型中,UPFC 能够有效降低区域电网负荷削减量,提高区域电网运行可靠性。(2) UPFC 能够有效提高可靠性效益,但是随着网络规模的增大,UPFC 的调节作用将局限于接入点的附近区域,通过合理的选址定容,可以更好地发挥 UPFC 在提高系统运行可靠性及其效益方面的作用。

#### 参考文献:

- [1] 吕磊炎,赵 渊,谢开贵. 柔性交流输电系统交直流潮流可靠性评估模型[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(1): 1-7.
- [2] 吴红斌,杨仪松,丁 明. 含统一潮流控制器的电力系统概率暂态稳定评估[J]. 江苏电机工程,2006,25(6):6-8.
- [3] 陈 刚,刘建坤,李 群. 统一潮流控制器技术现状及应用分析[J]. 江苏电机工程,2016,35(1):1-6.
- [4] 钱 臻,刘建坤,陈 静,等. 基于自动微分技术的含 UPFC 电力系统最优潮流[J]. 电网与清洁能源,2016,32(4):24-29.
- [5] 孙元章,程 林,刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术,2005,29(15):6-12.
- [6] 苏傲雪,范明天,李仲来,等. 计及风力发电影响的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):90-95.
- [7] 耿光超. 电力系统稳定约束最优潮流:模型、算法与并行化[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [8] 李文沅. 电力系统风险评估模型. 方法和应用[M]. 北京:科学出版社,2006:111-112.
- [9] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A Reliability Test System for Educational Purpose-basic Data [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.

#### 作者简介:



王薪

王薪(1991—),男,黑龙江海伦人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与控制;

李 群(1967—),男,江苏靖江人,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统优化运行与控制、电能质量、新能源发电技术研究工作;

刘建坤(1980—),男,山东潍坊人,高级工程师,从事电力系统计算和分析工作;

臧海祥(1986—),男,江苏江都人,讲师,博士,研究方向为虚拟电厂和新能源发电技术;

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析与运行控制;

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析与运行控制、输配电系统自动化等。

(下转第 46 页)



对变流器及电网的冲击。实验结果验证了算法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 刘波, 杨旭, 孔繁麟, 等. 三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 64-70.
- [2] 李群, 袁晓东, 李强. 新能源友好接入配电网适应性分析[C]//分布式新能源及微电网技术论文集. 江苏: 江苏省电机工程学会, 2013: 1-7.
- [3] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [4] 陆以军, 候梅毅. 基于同步发电机的分布式电源孤岛检测方法研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 66-70.
- [5] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 面向多逆变器的微电网电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 7-13.
- [6] 曾正, 邵伟华, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 13(39): 22-31.
- [7] 黄春燕. 引入虚拟电抗的独立运行微电网改进下垂控制[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(4): 39-43.
- [8] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters; Inverters That mimic

Synchronous Generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

- [9] ZHONG Q C, NGUYEN P L. Self-synchronized Synchronverters; Inverters Without a Dedicated Synchronization Unit[J]. IEEE Transactions Power Electron, 2014, 29(2): 1890-1838.
- [10] 黄华, 周波达, 费建平, 等. 基于根轨迹法的链式 STATCOM 比例谐振电流控制器设计[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 1-5.

#### 作者简介:



李旭

李旭(1986—), 男, 江苏徐州人, 工程师, 从事新能源发电应用与控制工作。

丁勇(1981—), 男, 江苏南通人, 高级工程师, 从事电力系统无功补偿及新能源发电工作。

李勇(1981—), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事新能源发电应用与控制工作。

刘为群(1966—), 男, 安徽滁州人, 研究员级高级工程师, 从事电力电子功率变换技术及应用工作。

## Phase angle control method of Virtual Synchronous Generator

LI Xu, DING Yong, LI Yong, LIU Weiqun

(Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Virtual synchronous generator (VSG) technology simulates the characteristics of the synchronous generator by power conversion system (PCS). Thus, the converter will have the characteristics of the synchronous generator such as primary frequency regulation, primary voltage regulation, damping and inertia. So the voltage and frequency regulation ability of converter for power grid will be enhanced. It can also help to improve the friendliness of grid-connection. In this paper, a new rectification method for phase angle and frequency of VSG based on phase locked loop (PLL) is proposed. The unreasonable deviation of frequency and phase is corrected in the process of starting grid connection and in the condition of strong disturbance, to reduce the oscillation and out-of-control risk under the above conditions. Finally, some experimental tests are given for correctness verification of the proposed method.

**Key words:** virtual synchronous generator; VSG; phase control; phase; frequency; pre-synchronizations

(上接第 42 页)

## Operating Reliability Research of 220 kV Divisional Power Grid Considering UPFC

WANG Xinping<sup>1</sup>, LI Qun<sup>2</sup>, LIU Jiankun<sup>2</sup>, ZANG Haixiang<sup>1</sup>, SUN Guoqiang<sup>1</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** With the continuous expansion of the interconnection scale of power grids, the number of the power electronics integrated to the power grid continues to increase, bringing new challenges to the operation reliability of the grid. As the equipment for flexible AC transmission system (FACTS) which has the strongest ability of adjusting power flow, the unified power flow controller (UPFC) has been designed, developed and applied to Nanjing western power grid successfully. In this paper, the operational reliability model considering UPFC is established and applied to perform the operation reliability analysis and benefit evaluation of Nanjing western power grid. The analysis results of the example demonstrate that UPFC can effectively improve the reliability of regional power network and positively contribute to economic benefits.

**Key words:** operation reliability; UPFC; benefit evaluation