

# 配电网主动闭环运行经济性分析

何小栋, 程 瑶

(安庆供电公司, 安徽 安庆 246000)

**摘要:**传统单馈线辐射状配电网将无法满足分布式电源的接入和用户对供电高可靠性的要求。分析了基于通信和电力电子技术,配电网主动闭环运行的可行性;提出了基于 Zbus 法的含分布式电源和环网的配电网潮流计算方法。通过 2 个算例分析配电网闭环运行的经济性,对于双馈线手拉手配电线路,两端电压相角差对闭环运行网损影响较大,当相角差不太大时,闭环运行是经济安全的;与配电网的重构相比,闭环运行对降低网损和提高电压质量效果明显。

**关键词:**主动配电网;闭环运行;Zbus 法;潮流计算

**中图分类号:**TM744

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2016)03-0042-04

传统配电网采用“闭环设计、开环运行”的供电方式,但随着大量分布式电源(Distributed Generations, DG)的并网和用户对供电高可靠性的要求,开环运行的弊端逐渐凸显。开环运行时,即使进行过馈线自动化改造,故障隔离和恢复供电时的倒闸操作也需要短时间的停电,阻碍了供电可靠性的进一步提高;随着分布式发电技术的快速发展,大规模 DG 接入配电网是必然趋势,但 DG 的接入改变了传统配电网的潮流分布,继电保护的选择性和灵敏度受到影响,基于通信平台差动保护技术的闭环运行配电网更适合 DG 的接入<sup>[1]</sup>;采用电力电子设备的闭环运行配电网可以主动进行有功和无功潮流控制,符合主动配电系统的发展方向<sup>[2]</sup>。随着通信和电力电子技术的快速发展,配电网采用闭环运行方式将是一种有效措施,近年来引起了人们的广泛关注<sup>[3]</sup>。文献[1]讨论了采用集中式保护的闭环运行配电网典型接线模式和规划原则;文献[3]探讨了配电网采用基于差动保护的闭环运行方式的应用前景。文中提出基于 Zbus 法的含分布式电源和环网的配电网潮流计算方法,并分析比较典型接线模式和 DG 并网下,配电网闭环运行的经济性。

## 1 配电网闭环运行可行性

### 1.1 基于网络通信平台的集中式电流差动保护

随着通信技术快速发展和高级配电网自动化系统的建设,基于全网光纤通道的配电网集中式差动保护技术越来越受到重视。电流差动保护在进行故障判别时只需要线路两端的电流量,不受系统振荡和非全相运行等因素的影响,原理简单,计算量小,能够较好地满足继电保护快速、灵敏和可靠等要求。图 1 所示为具有三层结构的集中式差动保护控制系统。其中,上层是智能配电主站;下层由配电自动化终端和配电变压器智能终端等设备组成;中间层由集中式保护控

制装置构成,起联系上、下层的作用。这种保护控制系统能实现配电网故障的准确定位、迅速隔离和快速重构,减少了非故障区域的停电机率,缩小了停电范围,提高了供电可靠性,能实现配电网的无缝快速自愈。

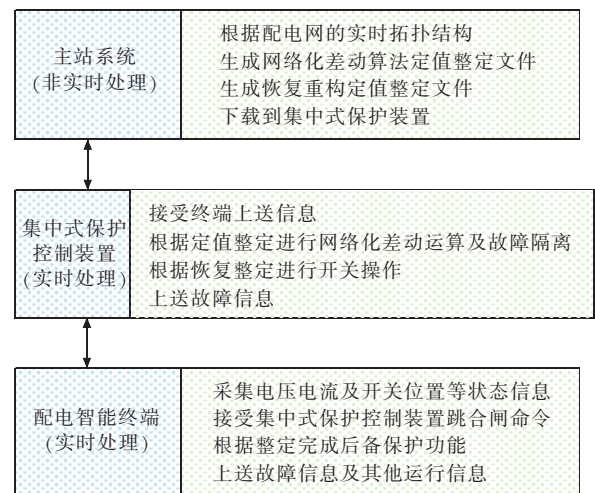


图 1 三层结构集中式差动保护控制系统

### 1.2 基于电力电子技术的潮流控制

传统辐射状配电网属于受电端,无法控制潮流。DG 的接入改变了原有网络的潮流分布,而且风光发电等 DG 输出的功率具有随机性,为了安全、优质、经济供电,需要对配电网中的潮流进行控制。基于电力电子技术与先进控制理论的统一潮流控制器(UPFC)具有强大的潮流控制功能,可以实现对含有 DG 的配电环网的潮流控制。UPFC 是由通过直流电容连接在一起的 2 个背靠背的电压源型变流器组合而成,可同时调节电力线输送功率的线路参数、节点电压幅值和相位<sup>[4]</sup>。鉴于目前电力电子器件的成本高、损耗大,在配电网中的应用还不具有经济性,但随着电力电子技术的进步,UPFC 的优势终将得到体现。

## 2 含分布式电源和环网配电网潮流计算

目前,基于前推回代法的传统辐射状配电网潮流

算法非常成熟,得到广泛应用,但对含各种 DG 和环网的配电网潮流计算的研究较少。文献[5]基于矩阵分裂和矩阵求逆辅助定理,导出了一种新的牛顿类少环配电网潮流算法;文献[6]研究了基于直接法的含 DG 配电网潮流算法;文献[7,8]基于叠加原理,提出了能同时处理弱环网和 PV 节点的配电网改进前推回代算法。配电网支路电抗和电阻参数相差不大,电缆线路还具有电阻大于电抗、充电电容较大的特点;与输电网相比,配电网支路数和节点数十分庞大。牛顿类的配电网潮流算法需要进行大量矩阵运算,效率低,不易收敛;前推回推法具有算法简单、易实现的特点,但处理环网能力不足<sup>[9-11]</sup>。文中提出基于 Zbus 法的含 DG 和环网的配电网潮流计算方法。

## 2.1 DG 接口模型

DG 与配电网互联的接口主要有 3 种形式,同步发电机、异步发电机、DC/AC 或 AC/AC 变换器,各种 DG 的典型容量范围和接口如表 1 所示<sup>[6]</sup>。

表 1 DG 的容量及其与电网的接口

发电形式	典型容量范围	与电网的常见接口
太阳能光伏	几瓦至几百瓦	DC/AC 变换器
风能	几百瓦至几兆瓦	异步发电机
地热能	几百千瓦至几兆瓦	同步发电机
海洋能	几百千瓦至几兆瓦	四象限同步发电机
微型燃气轮机	几十千瓦至几兆瓦	AC/AC 变换器
燃料电池	几十千瓦至几十兆瓦	DC/AC 变换器

潮流计算中,根据结构和控制方式的不同,DG 一般当做 PQ、PI 或 PV 节点。异步风力发电机、无励磁调节能力同步发电机、恒功率因素控制的同步发电机可当作 PQ 节点,将其看作“负”的具有电压静特性的负荷节点;电流控制光伏发电可当做 PI 节点,在迭代过程中,通过下式转换为 PQ 节点。

$$Q = \sqrt{I^2 V^2 - P^2} \quad (1)$$

燃料电池、电压控制双馈风力发电机和电压控制光伏发电当作 PV 节点,其最大无功出力受变流器容量限制。

$$Q_{\max} = \sqrt{S_{\max}^2 - P^2} \quad (2)$$

其中: $S_{\max}$  为变换器的最大容量; $P$  为 DG 发出的有功功率。

多台 PV 接入多馈线复杂结构的配电网如图 2 所示,设 PV 节点的灵敏度导纳矩阵为:

$$Y_{PV} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $Y_{11}$  为在 PV1 节点接入单位电压源,馈线和除 PV1 外的 PV 节点均接地时的短路电流; $Y_{12} = Y_{21}$  为在

PV1 节点接入单位电压源,PV2 节点接地时的负的短路电流值,其他类推。

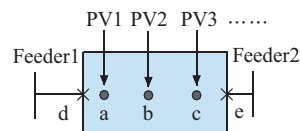


图 2 PV 接入多馈线复杂配电网

迭代过程中,根据 PV 节点电压幅值不匹配量对 PV 节点无功出力进行修正,忽略电压相角差,得:

$$\Delta U = Z_{PV} (\Delta P + j\Delta Q) \quad (4)$$

由于  $\Delta P$  为 0,故得 PV 无功出力的修正量为:

$$\Delta Q = B_{PV}^{-1} \Delta U \quad (5)$$

其中: $Z_{PV} = Y_{PV}^{-1}$ ,  $B_{PV} = \text{Im}(Z_{PV})$  为灵敏度电抗矩阵。迭代过程中,如果 PV 型 DG 无功越限,则转换为 PQ 节点,其无功出力为无功上限或下限,同时需要重新计算灵敏度电抗矩阵。

## 2.2 基本 Zbus 法

Zbus 法根据叠加原理,在电源点和负荷节点分别单独作用下的节点电压相加来求取网络节点电压。

(1) 电源点单独作用下的节点电压  $\dot{V}'$ :

$$\dot{I}' = Y \dot{V}' \quad (6)$$

(2) 负荷节点作用下节点电压:

$$\dot{I}'' = Y \dot{V}'' \quad (7)$$

(3) 应用叠加原理,节点电压:

$$\dot{V} = \dot{V}' + \dot{V}'' \quad (8)$$

其中: $\dot{I}'$  和  $\dot{I}''$  分别为电源点和负荷节点作用下节点注入电流; $Y$  为除电源节点外的节点导纳矩阵。

## 2.3 含分布式电源和环网配电网潮流计算流程

(1) 读取原始数据,求取全网节点导纳矩阵和 PV 节点灵敏度电抗矩阵;

(2) 计算馈线节点单独作用下节点电压  $\dot{V}'$ 。初始 PV 节点无功出力  $Q_{PV}$  为  $(Q_{\max} + Q_{\min})/2$ ,  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\min}$  分别为 PV 型 DG 无功出力上限和下限。

(3) 计算节点注入电流(PQ、PV 和 PI 节点)作用下节点电压  $\dot{V}''$ 。

(4) 根据叠加原理得节点电压: $\dot{V} = \dot{V}'' + \dot{V}'$ 。

(5) 由式 (5) 修正 PV 节点无功出力  $Q_{PV} = Q_{PV} + \Delta Q$ ;校验  $Q_{PV}$  是否越限。

(6) 检验迭代收敛的条件:所有节点  $\max \{|\dot{V}^{(k)} - \dot{V}^{(k-1)}|\} < \varepsilon$ ,无功不越限 PV 节点  $\max \{|\dot{V}^{(k)}| - V_0\} < \varepsilon$ ,无功越限 PV 节点无功出力等于  $Q_{\max}$  或  $Q_{\min}$ 。满足收敛条件则进入步骤 7;否则转入步骤 3。

(7) 计算结束,输出结果。

### 3 闭环运行经济分析

文献[12]构建了配电网线损计算模型,对工程中辐射状配电网不同降损措施的降损潜力进行计算分析,文中着重研究配电网主动闭环运行对降损的影响。

#### 3.1 算例 1

图 3 所示为常见的双电源手拉手配电线路,4、5 节点之间的支路开关为联络开关,合上联络开关,配电线路闭环运行。系统基准功率和电压分别取 10 MV·A 和 10 kV。

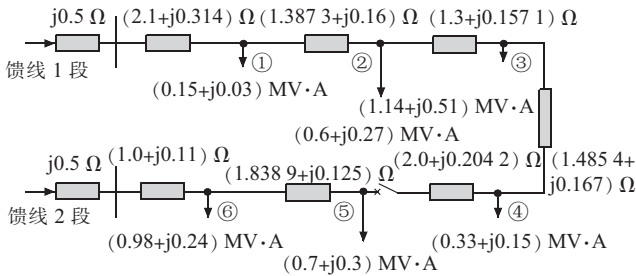


图 3 双电源手拉手配电线路

##### 3.1.1 双馈线来自变电站同一母线

表 2 为开、闭环运行下配电线路潮流计算结果,闭环运行比开环网损减少 38.35%,并且提高了最低节点电压。

表 2 开环和闭环潮流计算结果

运行方式	网损 /kW	最低节点电压 /kV	最大支路电流 /kA
闭环	399.4	9.034	102.1
开环	647.89	8.156	134.1

##### 3.1.2 双馈线来自不同母线

设馈线 1 段和馈线 2 段来自不同母线,馈线 2 段根节点电压幅值为基准值,相角 0 度,图 4 所示为开环和闭环运行下,馈线 1 段根节点电压幅值和相角变化时的网损三维图。馈线的电压幅值差对闭环运行的网损影响不大,而电压相角差影响较大;在根节点相角差较大时,闭环运行下的网损较大,这是不可行的;2 个曲面交叉区域为闭环运行的网损小于开环运行的区域。因此,只要两端的电压幅值和相角差在一定范围内,闭环运行与开环运行相比,具有较好的经济性。若在馈线 1 根节点后线路上串联 UPFC,串联 UPFC 可以控制电压的相角和幅值,从而可以消除线路循环功率,可使网损最小<sup>[4]</sup>,为 392.7 kW。

##### 3.1.3 分布式电源接入

设在 3、5 节点分别接入 100 kW 光伏发电和 500 kW 风力发电,均以恒功率因数 1 运行。表 3 为开、闭环运行下的潮流计算结果,闭环比开环运行减少网损 45.76%。

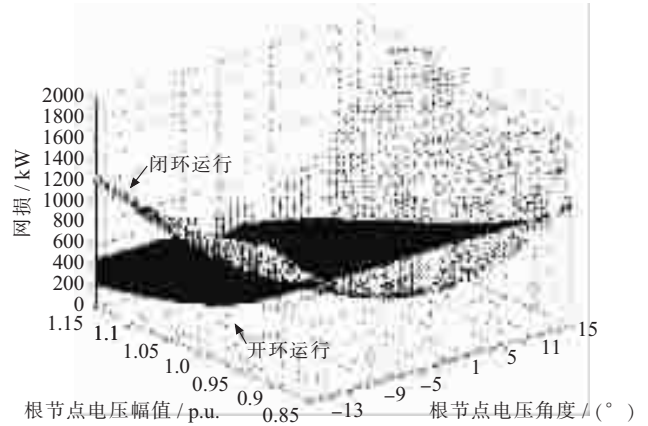


图 4 网损三维图

表 3 分布式电源接入时开、闭环潮流计算结果

运行方式	网损 /kW	最低节点电压 /kV	最大支路电流 /kA
闭环	314.2	9.139	87.4
开环	579.3	8.227	129.5

#### 3.2 算例 2

修改 IEEE14 节点配电网如图 5 所示,系统基准容量为 100 MV·A,基准电压为 23 kV,网络总负荷为 28.7+j17.3 MV·A。虚线所连的支路为联络开关所在支路,当闭合全部联络开关时,配电网闭环运行。

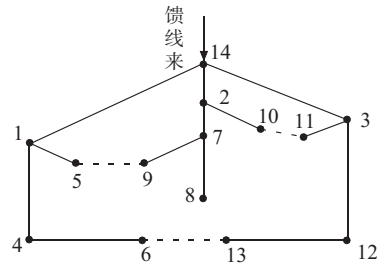


图 5 IEEE14 节点配电网

对开环运行 IEEE14 节点配电网进行以网损最小的网络重构,表 4 为开环、重构后和闭环下潮流计算结果,重构降低了网损,提高了最低节点电压。与网络重构相比,闭环运行更加经济,能降低网损 8.44%,节点电压更加均衡。

表 4 开、闭环和重构后潮流计算结果

运行方式	网损 /kW	最低节点电压 /p.u.	最大支路电流 /A
开环	657.7	9.52	262.8
重构后	606.6	9.56	233.6
闭环	555.4	9.65	185.8

### 4 结束语

基于先进的通信和电力电子技术,配电网闭环运行是可行的。提出了适合含分布式电源和环网的配电网潮流计算方法,通过算例分析了双电源手拉手典型配电线路闭环运行的经济区域,2 条馈线电压相角差

不大时,闭环运行是经济的;IEEE14节点配电网算例结果表明,与配电网重构相比,闭环运行降低网损和提高电压质量的效果明显。

#### 参考文献:

- [1] 黄伟军,钱远驰,吕志来. 闭环运行方式城市配电网接线模式的研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(24):123-126.
- [2] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
- [3] 张项安,张新昌,李卫星,等. 基于差动保护的配电网闭环运行方式探讨[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(3):102-106.
- [4] 仇志华,徐丙垠,陈青,等. 双电源故障无缝自愈配电网潮流优化控制方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(12):101-105.
- [5] 汪芳宗,叶婧,李燕山. 一种新的少环配电网潮流计算方法[J]. 电网技术,2008,32(1):47-50.
- [6] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):35-39.
- [7] 顾晨,乐秀璠,张晓明. 基于改进前推回代法的弱环配电网三

- 相潮流计算[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):160-164.
- [8] 丁明,郭学风. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13):35-40.
- [9] 车仁飞,李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):74-79.
- [10] 李红伟,张安安. 含PV型分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):128-135.
- [11] 戴晖,孙波. 新型实用合环潮流算法在配电网中的应用[J]. 江苏电机工程,2015,34(1):47-49.
- [12] 顾江,陆涟,杨江,等. 基于等值电阻和回归分析的配电网降损潜力研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(3):61-63.

#### 作者简介:

何小栋(1989),男,安徽安庆人,硕士,从事电网技术技能培训和配电网自动化研究工作;  
程瑶(1991),女,安徽六安人,硕士,从事电费管理和账务相关技术工作。

## Economical Analysis of Distribution Network Closed-loop Operation

HE Xiaodong, CHENG Yao

(Anqing Power Supply Company, Anqing 246000, China)

**Abstract:** With the distributed generation increasingly integrating to the grid, the traditional single feeder radial distribution network becomes unsuitable. Based on the communication and power electronic technology, the feasibility of distribution network closed-loop operation is analyzed. Based on the Z-bus method, the power flow calculation method for the distribution network with distributed generation and rings is proposed. The economy of distribution network closed-loop operation is analyzed. For the hand in hand double feeder distribution network, the voltage phase angle difference has great influence on the loss of closed-loop operated distribution network. When the difference is not too big, closed-loop operation is economic and security. Compared with the reconstruction of distribution network, the closed-loop operation decreases network loss and improves voltage quality more obvious.

**Key words:** active distribution network; closed-loop operation; z-bus; power flow calculation

(上接第41页)

#### 作者简介:

叶冠豪(1990),男,安徽巢湖人,助理工程师,从事电力电缆运维及在线监测工作;  
郭湘奇(1973),男,河北秦皇岛人,工程师,从事电力电缆检修管理

#### 工作:

王一磊(1983),男,江苏南京人,工程师,从事电力电缆检修工作;  
邓鹏(1985),男,山西永济人,工程师,从事电力电缆试验及电力电缆施工与运维管理工作。

## On-line Monitoring of Ground DC Current for Cross-linking XLPE Cable System

YE Guanhao, GUO Xiangqi, WANG Yilei, DENG Peng

(Nanjing Electric Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** This paper studies the on-line monitoring issues for water treeing of electric cable cross linking system by using DC component method. The standard cross-linking system is analyzed and its equivalent circuit is established. The factors causing faint DC current component are studied quantificationally. Current sampling and low pass filter modules are designed and the weak DC current component can be sampled and filtered. Field testing results show that the current sampling and low pass filter modules are correct.

**Key words:** on-line monitoring; DC current component method; water treeing; cross-linking system