

# 准同期并网中三相不平衡问题的优化

海涛<sup>1</sup>, 闭耀宾<sup>1</sup>, 骆武宁<sup>2</sup>, 黄新迪<sup>1</sup>, 王立元<sup>1</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 广西南宁 530004, 2. 南宁微控技术有限公司, 广西南宁 530000)

**摘要:** 基于对并网装置运行状况的调研, 提出了准同期并网时三相不平衡问题的优化方案。从准同期并网的条件入手, 然后由并网冲击电流的等效电路图和并网相位不相等时的相量图, 对合闸瞬间的相角差与冲击电流的关系进行分析, 并推导出并网冲击电流的计算公式。分析网侧变压器电压相角不对称的主要原因, 最后由冲击电流的大小选择并网的操作相, 该方案有效提高了并网时的可靠性和安全性。

**关键词:** 并网; 准同期; 相角差; 冲击电流; 三相不平衡

## Optimized strategy of three-phase unbalance in synchronized grid-connected

HAI Tao<sup>1</sup>, BI Yao-bin<sup>1</sup>, LUO Wu-ning<sup>2</sup>, HUANG Xin-di<sup>1</sup>, WANG Li-yuan<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Nanning Microcontrol Technique Co., Nanning 530000, China)

**Abstract:** According to the analysis of synchronization device, this paper advances an optimal method of three-phase unbalance in synchronized grid-connected. First, it introduces the qualification of grid-connected. Then, from equivalent circuit diagram of surge current and vector diagram of unequal vectors, it analyzes the relation between angular phase difference and surge current. Furthermore, the expression of surge current is deduced out. The reasons of three-phase unbalance of transformer are analyzed. At last, the operational phase of grid-connected is based on the value of the surge current. This optimized strategy is helpful to improve the reliability and stability of grid-connected.

**Key words:** grid-connected; synchronization; angular phase difference; surge current; three-phase imbalance

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0070-04

## 0 引言

随着分布式发电(distributed generation)技术的日趋成熟, 分布式电源凭借其发电方式灵活、环境友好等优点越来越多地被接入配电网, 对配电系统的结构和运行产生了重大影响<sup>[1,2]</sup>。

要保证分布式电源的正常运转, 发电机的并网就是一项频繁而重要的操作, 要求操作过程准确、迅速和可靠。在并网瞬间, 若操作不当会产生危害性的冲击电流, 导致机组绕组的电气损伤; 甚至产生很大的电磁转矩, 造成发电机轴系机械损伤。现代准同期并网技术在传统装置基础上引入微机控制, 已实现自动获取最佳合闸时机并网。但实际运行中仍还会出现一些问题, 如并网中因三相不平衡问题导致冲击电流的危害就值得我们探讨。

## 1 准同期并网的条件

根据准同期并列的电压相量分析, 并网前的断路器两侧电压为:

发电机侧电压

$$u_G = U_G \sin(\omega_G t + \psi_G) \quad (1)$$

电网侧电压

$$u_S = U_S \sin(\omega_S t + \psi_S) \quad (2)$$

设发电机电压的角频率为 $\omega_G$ , 电网电压的角频率为 $\omega_S$ , 发电机电压与电网电压的相角差为 $\varphi_{SG}$ , 电压相量图如图1所示。

并网瞬间的电压差:

$$\dot{U}_{SG} = \dot{U}_G - \dot{U}_S \quad (3)$$

根据电压三角形计算:

$$U_{SG} = \sqrt{U_S^2 + U_G^2 - 2U_S U_G \cos \varphi_{SG}} \quad (4)$$

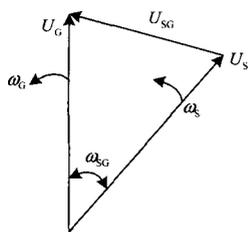


图 1 准同期并网相量图

Fig.1 Vector diagram of parallel operation

并网合闸的理想条件是：断路器两侧电源的三个状态量全部相等<sup>[3]</sup>。

- (1) 两电压幅值相等：  $U_G = U_S$
- (2) 两电压角频率相等：  $\omega_G = \omega_S$
- (3) 合闸瞬间的电压的相角差为零：  $\varphi_{SG} = 0$

特别指出，如果  $\omega_G = \omega_S$ ，那么两电压相对静止，如果此时存在着相角差，那么根本无法实现  $\phi = 0$ ，因此现实中上述角频率相等的条件应该理解为角频率相近。

## 2 合闸相角差与冲击电流<sup>[3~5]</sup>

设并网时，电压幅值  $U_G = U_S$ ， $\omega_G = \omega_S$ ，合闸瞬间存在相角差  $\varphi_{SG} \neq 0$ ，则计算并网冲击电流的等效电路如图 2 所示，相量关系图如 3 所示。

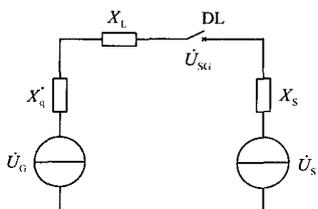


图 2 并网冲击电流的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of surge current in grid-connected

图 2 中： $X_q''$  为发电机横轴次暂态电抗； $X_L$  为线路电抗； $X_S$  为等值系统电抗。

由相量图图 3 看出，在并网瞬间，由于电压差

$\dot{U}_{SG}$  作用，产生冲击电流  $I_{ip}''$ ：

$$I_{ip}'' = \frac{\dot{U}_G - \dot{U}_S}{j(X_q'' + X_L + X_S)} = \frac{\dot{U}_{SG}}{j(X_q'' + X_L + X_S)} \quad (5)$$

结论 1：在电网参数一定时，冲击电流的大小由合闸瞬间的  $\dot{U}_{SG}$  值决定。进一步计算冲击电流的

有效值：

$$I_{ip}'' = \frac{U_{SG}}{X_q'' + X_L + X_S} = \frac{2E_q''}{X_q'' + X_L + X_S} \sin \frac{\varphi_{SG}}{2} \quad (6)$$

式中： $E_q''$  为发电机纵轴次暂态电动势。由图 3 可知，冲击电流主要表现为有功电流分量。图 3 (a) 中，发电机电压相位超前系统电压  $\varphi_{SG}$ ，冲击电流  $I_{ip}''$  和发电机电压  $\dot{U}_G$  同向，发电机送出有功功率；图 3 (b) 中，发电机电压相位滞后系统电压  $\varphi_{SG}$ ，冲击电流  $I_{ip}''$  和发电机电压  $\dot{U}_G$  反向，发电机吸收有功功率。

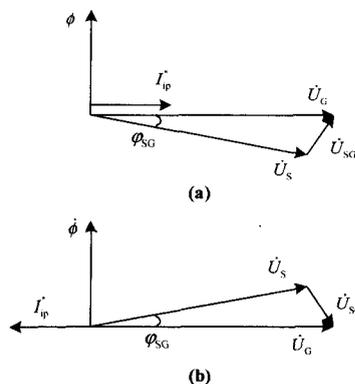


图 3 并网相位不相等时的相量图

Fig.3 Vector diagram of unequal vectors in parallel operation

冲击电流最大瞬时值为：

$$i_{ipmax}'' = \sqrt{2}K_{ip} \times i_{ip}'' = 2.687i_{ip}'' \quad (7)$$

式中： $K_{ip}$  为短路冲击系数；当短路发生在单机容量为 12 MW 及以上的发电机母线上时，短路冲击系数取 1.9。

结论 2：在电网和发电机参数一定时，冲击电流大小主要取决于合闸瞬间  $\varphi_{SG}$  的值。

在合闸瞬间主要考虑多大的电压差和多大的功角可以并网。电压差的数值决定了并网时两电源间的无功功率冲击值，功角的数值决定了并网时两电源间通过该联络线的潮流冲击值<sup>[6]</sup>。

## 3 并网中三相不平衡问题优化

理想状况下电网三相电之间和发电机所发出的三相电一样，三相之间都是相差  $120^\circ$ ，只需判断出 A、B 和 C 三相以及相序，任意选择一相都可以

很好地进行并网操作。

实际上并网瞬间有 2 相常出现冲击电流。使用存储示波器检测,发现并网装置工作正常,发电机产生的三相电没有问题,每相之间相隔  $120^\circ$ ,电网的三相电相互间的相角出现偏差。

### 3.1 网侧变压器电压相角不对称的主要原因

(1) 配电变压器的结构产生的不平衡

配电变压器采用三芯柱为基础,三相双绕组的构造方式。这种结构,三相磁路互相关联,中间相的磁路短,磁阻小,两边两相磁路的磁阻比中间一相磁阻大一些,容易产生励磁电流不平衡。如三相电压对称时,各相磁通相等,但三相空载电流不等,中间那相空载电流小一些。在小容量变压器中表现较明显,一般

$$I_{0A} = I_{0C} = (1.2 \sim 1.5)I_{0B} \quad (8)$$

在大型变压器中,其不平衡度较小,对负载影响不大。另外,变压器的实际状况和理想状况是有差距的,主要表现为:磁滞损耗、涡流损耗和漏磁通现象,甚至铁芯的冷却处理不完善,都会导致微小的不平衡。

(2) 配电变压器的联结方式产生的不平衡

根据电力系统不对称运行状况,采用对称分量法分析。对网侧变压器电压分解:正序分量三相大小相等,彼此相位差  $120^\circ$ ,相序为  $U_{A1} - U_{B1} - U_{C1}$ ;负序分量三相大小相等,彼此相位差  $120^\circ$ ,相序为  $U_{C1} - U_{B1} - U_{A1}$ ;零序分量  $\dot{U}_{A0}$ 、 $\dot{U}_{B0}$ 、 $\dot{U}_{C0}$  三相大小相等,方向相同,彼此之间相位差相等。

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \\ \dot{U}_B = \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0} \\ \dot{U}_C = \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0} \end{cases} \quad (9)$$

由此可见,导致网侧变压器电压相角偏离  $120^\circ$  的是零序电势的叠加,零序电流又与变压器的联接方式有关。

我国和国际上大多数国家的 10 kV 配电变压器均采用 Dyn11 联结 (GB/T6451-1999 和 GB/T10228-1997)。这种联接方式有较好的承受不平衡负载能力,利于抑制高次谐波电流<sup>[7]</sup>。Dyn11 联接方式的零序电流在双侧绕组内均可流通,其零序阻抗的大小还与变压器的磁路结构有关。经过测试,零序电流取决于次级侧的中线电流,不流入电

源。即使中线电流很小,也能造成相电压轻微的不对称。

(3) 三相负载不平衡造成的不平衡

当配电网三相负载分配不平衡时,流过变压器三相的电流就不对称,会产生零序电流,零序电流与三相负载不平衡度成正比关系。在实际运行过程中,三相电流不对称会导致 A、B、C 三相之间的相角差稍偏移  $120^\circ$ <sup>[8]</sup>。

### 3.2 针对不平衡状况的并网措施

由于现实中配电变压器的不对称性导致了电网三相电之间并不都是  $120^\circ$ ,这样即使一相在相位角为零时并入电网,其余 2 相由于不对称而导致合闸时存在着一定的相位角差,从而引发了冲击电流。

假定发电机相之间角度分别为  $\varphi_{AB}$ 、 $\varphi_{BC}$ 、 $\varphi_{CA}$ ,电网为  $\varphi_{ab}$ 、 $\varphi_{bc}$ 、 $\varphi_{ca}$ 。电网三相间出现了不平衡, $\varphi_{ab}$  和  $\varphi_{bc}$  产生了  $4^\circ$  偏差, $\varphi_{ca}$  相应产生了  $8^\circ$  偏差。如图 4 所示。

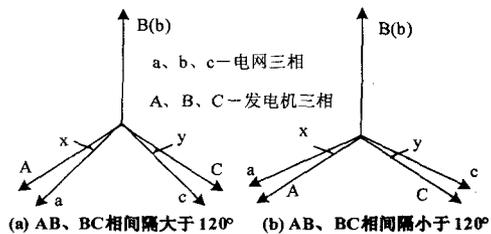


图 4 三相存在不平衡的矢量示意图

Fig.4 Vector diagram of three phase unbalanced voltage

并网装置以 B 相为操作相进行并网操作,那么在 B 相相位角为  $0^\circ$  时,合闸指令发出。电机三相之间  $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = 120^\circ$ ,如图 4(a)所示,电网  $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = 124^\circ$ , $\varphi_{ca} = 360^\circ - 248^\circ = 112^\circ$ 。即  $x=y=4^\circ$ 。此时如果 B 相为并网相,因为  $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = 124^\circ$ ,所以合闸后 A 相存在  $4^\circ$  误差,C 相也存在  $4^\circ$  误差,合闸并网后最大误差为  $4^\circ$ 。同理推算出用 A、C 相进行并网的误差角,如表 1。

表 1 合闸误差比较

Tab.1 Comparison of the closing time error

并网相	A 相误差角	B 相误差角	C 相误差角	最大误差角
A	0	a	2a	2a
B	a	0	a	a
C	2a	a	0	2a

图 4(b)所示的是  $\varphi_{ab}$  与  $\varphi_{bc}$  小于  $120^\circ$  的情况,其分析和大于  $120^\circ$  相似。实验证明采用 B 相

作为参考相并网, 效果明显好于 A 相或 C 相并网, 产生的冲击电流是最小的。

#### 4 结论

并网装置运行中遇到的三相不平衡问题非常普遍, 处理不当会产生较大冲击电流, 造成并网装置或系统的损坏。文中对并网条件、冲击电流产生的原因和三相不平衡的原因进行分析, 最后冲击电流的计算大小选择并网的操作相, 得出结论: 并网时选取 B 相进行, 产生的合闸相角差最小, 冲击电流最小。这样就优化了并网三相不平衡的问题, 提高了并网时的可靠性和安全性。

#### 参考文献

- [1] 韦刚, 吴伟力. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36-40.  
WEI Gang, WU Wei-li. Distributed Generation and Effects of Its Parallel Operation on Power System[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 36-40.
- [2] 刘杨华, 吴政球, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.  
LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu, et al. A Survey on Distributed Generation and Its Networking Technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76.
- [3] 张艳霞, 王锡凡. 电力系统保护与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 105-124.  
ZHANG Yan-xia, WANG Xi-fan. Power System Protection and Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 105-124.
- [4] 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.  
GE Shao-yun, LI Xiao-ming. Study on Surge Current Due to Closing Loop in Distribution Network Based on Thevenin's Equivalent[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(6): 124-127.
- [5] 叶清华, 唐国庆, 等. 配电网合环操作环流分析系统的开发和应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 66-69.  
YE Qing-hua, TANG Guo-qing, et al. Development and Application of the Analysis System for Closed Loop Operation of Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 66-69.
- [6] 潘书燕, 曹团结, 等. 在线路监控单元中实现的准同期功能[J]. 继电器, 2003, 31(12): 58-60.  
PAN Shu-yan, CAO Tuan-jie. Necessity of the Quasisynchronization Functions in the Line Monitor and Control Unit[J]. Relay, 2003, 31(12): 58-60.
- [7] 侯彦方. 配电变压器采用 Dyn11 联结组的优势分析[J]. 电气应用, 2008, 27(6): 50-52.  
HOU Yan-fang. The Analysis About Advantage of Dyn11 Using in Distribution Transformer[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(6): 50-52.
- [8] 张五一, 张言滨, 等. 配电网三相负荷不对称的线损分析[J]. 继电器, 2007, 35(7): 24-27.  
ZHANG Wu-yi, ZHANG Yan-bin, et al. Circuit Loss Analysis of Three-phase Unbalanced Circuit in Distribution Network[J]. Relay, 2007, 35(7): 24-27.

收稿日期: 2008-10-13; 修回日期: 2009-02-19

作者简介:

海 涛 (1963-), 男, 硕士生导师, 高级工程师, 主要研究方向为工业自动化、检测仪表等; E-mail: haitao@gxu.edu.cn

闭耀宾 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合自动化。

(上接第 61 页 continued from page 61)

ZHANG Yong, XIE Shao-jun. Three-phase Static Converter with High Power Output[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 34(1): 57-61.

[12] Zhang Z C, Kuang J, Wang X, et al. Force Commutated HVDC and SVC Based on Phase Shifted Multi-converter Modules[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 712-718.

[13] Leon M T, Peng F Z, Thommas G H. Multilevel PWM Methods at Low Modulation Indices[J]. IEEE Trans on P E, 2000, 15(4): 719-725.

[14] Peng F Z, LAI Jin-sheng, Mckeever J, et al. A Multilevel Voltage-source Inverter with Separate DC Sources for Static VAR Generation[J]. IEEE Trans on I A, 1996, 32(5): 1130-1137.

收稿日期: 2008-11-04

作者简介:

郑 建 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术

在电力系统中的应用; E-mail: jian807@hotmail.com  
陈劲操 (1956-), 男, 教授, 主要研究方向为测试技术, 电力电子技术在电力系统中的应用。