

相间功率控制器运行特性仿真分析

李娟, 刘修宽, 纪延超, 柳焯

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 以具体的相间功率控制器(interphase power controller——IPC)的基本结构为基础, 采用 MATLAB 动态仿真工具 SIMULINK, 以两个电网间只由一条带 IPC 的联络线进行弱连接为例, 仿真分析了 IPC 的运行特性。从仿真结果可以看出: (1) 正常运行通过开关投切不同组数的电容器和电感器, 可以有效地改变联络线传输的潮流。(2) 在系统受扰动的情况下, 当联络线受端侧发生短路故障, IPC 具有电压解耦, 使两侧电网相互隔离的优良特性; 而当发生断线故障时, 却容易引起送端侧 IPC 入口处电压下降和 IPC 电容器上产生过电压的问题。

关键词: 相间功率控制器; 运行特性; MATLAB; 仿真分析

中图分类号: TM743 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2003)06-0065-04

1 引言

相间功率控制器是近年来发展起来的 FACTS 家族中的一员。最初是由加拿大魁北克输电技术革新中心提出来的, 由于其具有独特的运行特性, 正日益受到国内外学者的高度重视^[1-5]。目前, 对相间功率控制器大部分集中在其稳态特性的研究上, 而对动态特性的仿真研究却较少。

本文基于 IPC 基本结构模型和数学模型, 以两电网间只由一条带 IPC 的联络线进行弱连接为例, 利用 MATLAB 进行了仿真分析, 由于只由一条带 IPC 联络线连接的两电网中 IPC 的主要作用是控制潮流和实现互联电网事故隔离, 本文也是以这一方面为基础进行的, 至于多条联络线普遍装设 IPC, 或一部分联络线装设 IPC, 另一部分是直流互联的环网, 这种复杂情形的仿真分析还需以后作进一步的研究。

2 含 IPC 的简单互联系统及其模型

2.1 结构模型

相间功率控制器的基本结构是在每相输电线路中串入并联的容抗和感抗支路, 图 1 展示出了两 220 kV 电网只由一条带 IPC 的联络线进行弱连接的结构模型图, 将送端电网(S 侧)和受端电网(R 侧)按等值原理分别简化为送端和受端等值三相电源。

2.2 数学模型

带 IPC 的联络线电流, 以 A 相为代表, 可以按式(1)和(2)来进行计算^[6]。由送端流出到 IPC 入口的电流:

$$I_A = \frac{A_{F1} E_A - A_{F2} E_a}{A_{F3} Z_S + (F_T + F_R) Z_S} \quad (1)$$

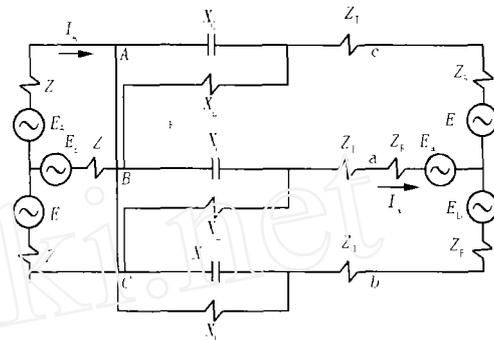


图 1 带相间功率控制器的电网结构模型图

Fig. 1 Structural figure of power system with interphase power controller

其中: $A_{F1} = \frac{F_L + F_C + 3(F_T + F_R)}{3 + F_L + F_C}$,

$$A_{F2} = \frac{F_L e^{-j\pi/3} + F_C e^{j\pi/3}}{3 + F_L + F_C}$$

由 IPC 出口经联络线流入受端的电流:

$$I_a = \frac{A_{F4} E_A - E_a}{A_{F3} Z_S + (F_T + F_R) Z_S} \quad (2)$$

其中: $A_{F3} = \frac{F_L F_C + F_L + F_C}{3 + F_L + F_C}$,

$$A_{F4} = \frac{F_L e^{-j2\pi/3} + F_C e^{-j\pi/3}}{3 + F_L + F_C}$$

式(1)、(2)中: E_A 、 E_a 分别为送端一侧电网和受端一侧电网的等值电动势, Z_S 为送端侧电网的等值内阻抗, F_R 、 F_T 分别为受端电网等值内阻抗 Z_R 和联络线阻抗 Z_T 与送端侧电网的等值内阻抗 Z_S 的比值; F_L 、 F_C 分别是相间功率控制器中电感元件与电容元件的阻抗相对于送端电网的等值内阻抗的比值。其中:

$$F_L = \frac{jX_L}{Z_S e^{j\theta_S}} = \frac{X_L}{Z_S} e^{j(\frac{\pi}{2} - \theta_S)} = f_L e^{j(\frac{\pi}{2} - \theta_S)},$$

$$F_C = \frac{-jX_C}{Z_S e^{j\theta_S}} = \frac{X_C}{Z_S} e^{-j(\frac{\pi}{2} + \theta_S)} = f_C e^{-j(\frac{\pi}{2} + \theta_S)}$$

送端电压和送出的潮流:

$$U_A = E_A - I_A Z_S, \quad S_A = U_A \dot{I}_A \quad (3)$$

受端电压和流入的潮流:

$$U_a = E_a - I_a Z_R, \quad S_a = U_a \dot{I}_a \quad (4)$$

由公式(1)~(4)可以看出当需要改变联络线潮流时主要通过改变 IPC 连接的电感和电容值进行, 这样可以将电感和电容进行分组, 然后由相应的开关连接, 通过改变 IPC 连接不同组数的电容器和电感器, 从而改变联络线潮流的大小。

本文在仿真过程中采用的元件参数为: IPC 每

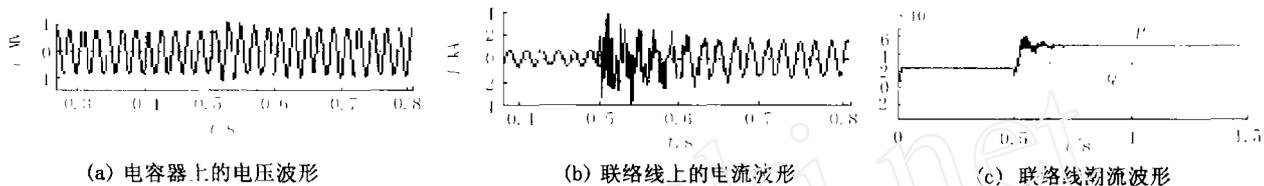


图2 改变 IPC 连接的电容器和电感器组数的仿真波形

Fig.2 Simulation curves of changing capacitor and reactor

由图2可知, 当 IPC 增加一组电容器和电感器, 电容器上的电压几乎没有增加, 主要是传输线上的电流增加, 从而使得传输的功率增加, 这有利于在一定的功率传输范围内, 保持电容器上的电压在其最大过电压范围内。

4 IPC 受扰动时的仿真研究

为了考察含 IPC 系统的动态特性, 设计了两大

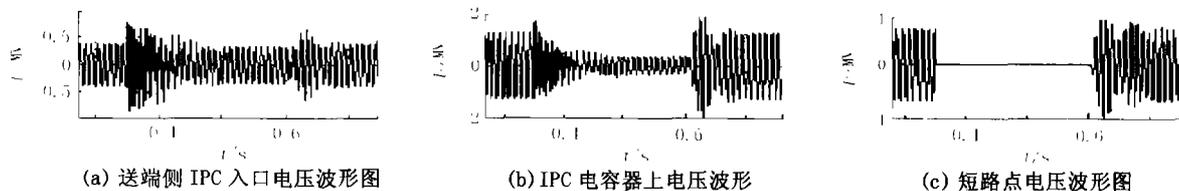


图3 联络线受端侧三相接地短路仿真波形图

Fig.3 Simulation curves of three-phases short-circuit to ground on R side

由图3、4、5可以看出当 IPC 连接的两电网联络线受端侧发生短路故障, 对送端侧 IPC 入口处的电压影响较小, 这主要由于相间功率控制器的电容和电感支路呈现高阻抗的特性, 使得 IPC 连接的两电网可以实行短路时相互隔离, 具有电压解耦的特性。相间功率控制器的这种优良特性可以利用公式(1)和(3)加以说明。

相串联的一组电容器 $C = 18.995 \mu\text{F}$, 电感 $L = 0.534 \text{ H}$ 。

3 IPC 正常运行状态下的仿真分析

本文通过仿真研究含 IPC 电力系统在正常运行状态下(无短路等的扰动)的特性, 包括改变 IPC 连接的不同电容器和电感器的组数、电容器上的电压、联络线潮流的响应特性。

先假设仿真开始时 IPC 控制联络线潮流系统处于稳定运行状态, 在某一时刻由于某种原因需要改变联络线传输的潮流, 本文以机械开关在 0.5 s 投入另外一组电容器和电感器, 进行仿真研究, 仿真结果示于图 2 中。

类扰动情况, 一类是 IPC 连接的两电网联络线受端侧发生短路故障; 另一类是联络线受端侧发生断线故障。假设了以下几种扰动情况:

(1) 稳态运行的 0.35 s 时, 联络线受端侧分别突然发生三相接地短路、两相接地短路、单相接地短路故障, 0.6 s 时短路切除, 仿真结果分别示于图 3、4、5 中。

为了便于分析, 以三相短路为例, 当联络线受端侧发生短路故障, 公式(1)中的 E_a 和 F_R 将变为 0, 这样公式(1)可以近似为 $I_A = \frac{F_T E_A}{(-F_L/3 + F_T) Z_S}$, 代入式(3)可得: $U_A = \frac{-F_L E_A/3}{-F_L/3 + F_T}$, 由于 IPC 支路的电感阻抗值远大于联络线的阻抗值, 因此 U_A 的大小

与送端的等值电势相差不大,所以即使联络线受端侧短路使电压降为0,送端侧 IPC 入口处的电压也

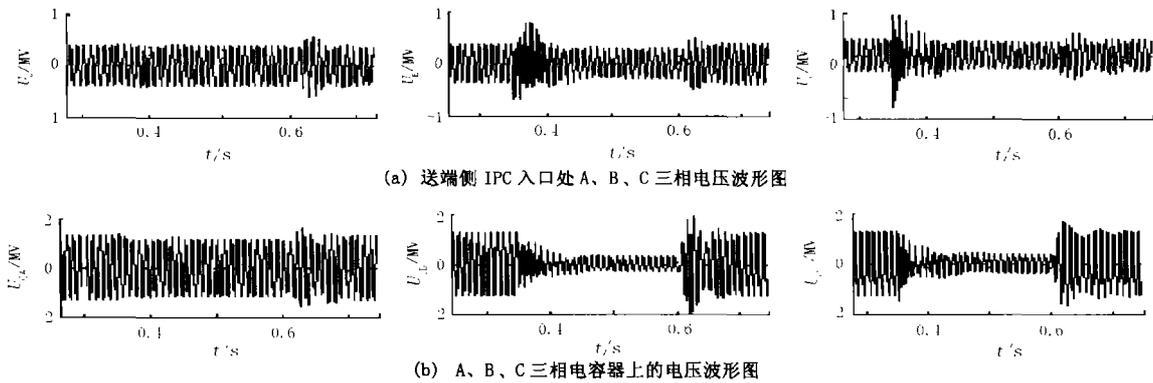


图 4 联络线受端侧两相接地短路仿真波形图

Fig.4 Simulation curves of two-phase short-circuit to ground on R side

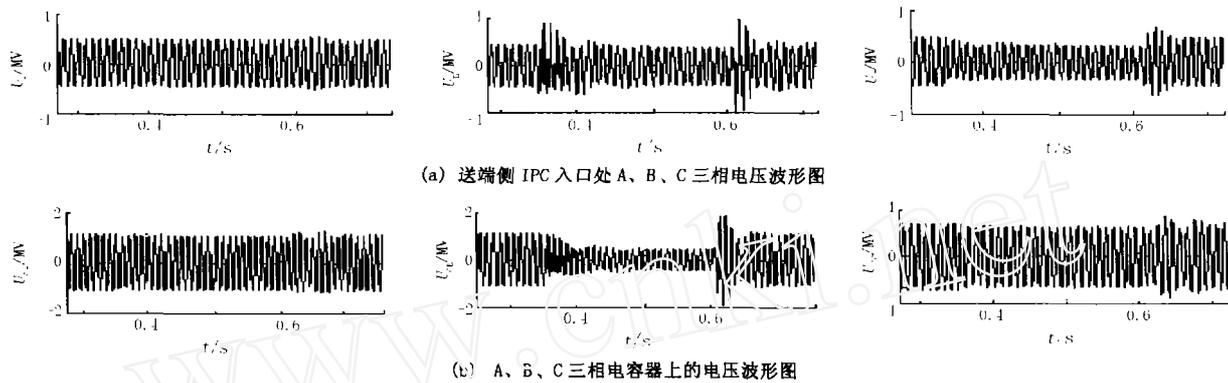


图 5 联络线受端侧单相接地短路仿真波形图

Fig.5 Simulation curves of single-phase short-circuit to ground on R side

由仿真图形 4、5 可知,当联络线受端侧发生两相(a、b相)接地短路,送端侧 IPC 入口处的电压以及 IPC 电容器上的电压 A 相所受的影响最小,B、C 相所受的影响基本相同。当联络线受端侧发生单相(a相)接地短路故障,送端侧 IPC 入口处电压以及

IPC 电容器上的电压 A、C 两相所受的影响小,而 B 相所受的影响较大。

(2) 稳态运行的0.2s时,联络线受端侧分别突然发生三相断线、两相断线、单相断线故障。仿真结果示于图 6、7、8 中。



图 6 联络线受端侧三相断线仿真波形图

Fig.6 Simulation curves of three-phase open-circuit on R side

由图 6、7、8 可以看出,当 IPC 连接的联络线受端侧发生断线故障,送端侧 IPC 入口处的电压将降低,其中三相断线电压降低的最为严重,这种联络线受端侧断线故障引起送端侧 IPC 入口电压降低的现象,也可以由公式(1)和(3)加以说明。

以三相断线为例,当断线发生时,可以近似认为

联络线的阻抗比为 ∞ ,所以公式(1)可以近似表示为:
$$I_A \approx \frac{3F_T E_A}{3F_T Z_S} \approx \frac{E_A}{Z_S}$$
代入公式(3)可得:
$$U_A \approx 0$$
这样,当联络线受端侧发生断线故障,会引起送端侧 IPC 入口电压降低,降低的程度不仅与断线的类型有关,也与 IPC 的电感和电容元件的具体数值有关。

对非对称断线故障,由图 7、8 的仿真结果可知:当联络线受端侧发生 a、b 两相断线,送端侧 IPC 入口处 A、B、C 三相电压均有较大的降低,以 C 相降低的最严重;而且 B、C 相的电容器上都出现较高的电

压。当联络线受端侧发生 a 相单相断线时,送端侧 IPC 入口处 B、C 相电压有所降低,而 A 相几乎没有太大的变化,同时 IPC 的 B 相电容器上的电压较高。

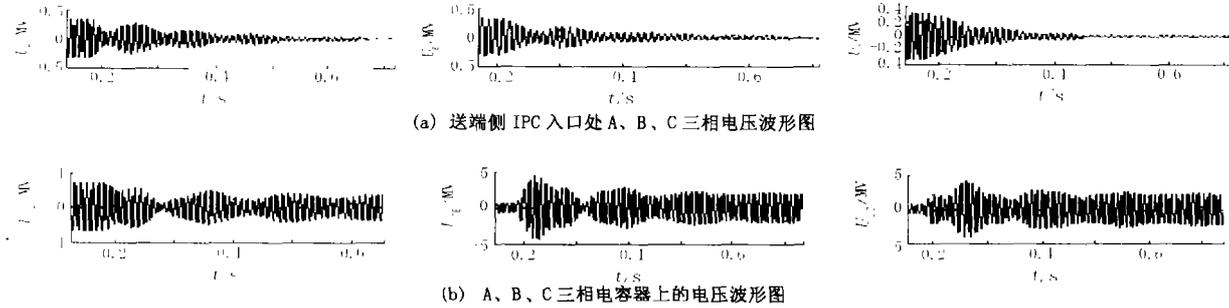


图 7 联络线受端侧两相断线仿真波形图

Fig.7 Simulation curves of two-phase open-circuit on R side

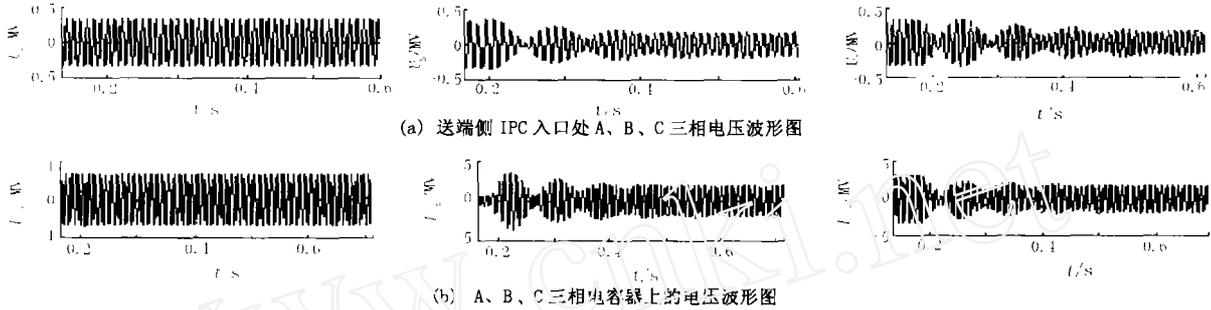


图 8 联络线受端侧单相断线仿真波形图

Fig.8 Simulation curves of single-phase open-circuit on R side

5 结论

本文采用 SIMULINK 实现了两互联电网只由一条带 IPC 联络线进行弱连接的仿真研究,仿真结果表明:在正常运行情况下,控制 IPC 连接的电容器和电感器组数可以有效地改变联络线传输潮流的大小;在扰动情况下,当 IPC 连接的联络线受端侧发生短路故障时,由于 IPC 的高阻效应可以使得两侧电网在短路时相互隔离,具有电压解耦的特性。而当联络线受端侧发生断线故障时,送端侧 IPC 入口处的电压会降低,并且电容器上存在过电压的危险,这一点应该引起注意。

参考文献:

- [1] Brochu J, Pelletier P, et al. The interphase power controller: a new concept for managing power flow within AC networks[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, 9(2): 833-841.
- [2] Sybill G, Haj-Maharsi Y, Morin G, et al. Simulator Demonstration of the Interphase Power Controller Technology[J].

IEEE Trans on PWRD, 1996, 11(4): 1985-1992.

- [3] Brochu J, et al. Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997(2): 888-894.
- [4] 何大愚. 柔性交流输电技术及其控制器研制的新发展[J]. 电力系统自动化, 1997, (2): 1-6.
- [5] 于继来, 柳焯. 相间功率控制器的稳态分析及与移相器的特性比较[J]. 中国电机工程学报, 1999(8): 25-29.
- [6] 曲祖义, 于继来, 柳焯. 相间功率控制器机理的电路解析[J]. 中国电机工程学报, 2001(3): 37-40.

收稿日期: 2002-07-02; 修回日期: 2003-03-11

作者简介:

李娟(1972-)女, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;

刘修宽, 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;

纪延超, 男, 博士生导师, 研究方向为计算机在电力系统中的应用。

(下转第 77 页)

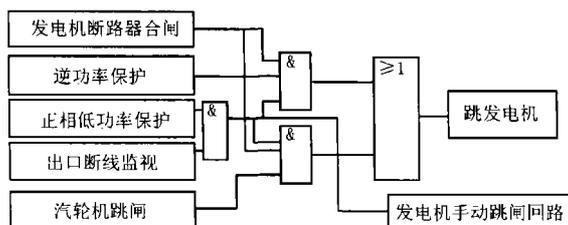


图6 正相低功率保护修改之后逻辑图

Fig.6 The logic diagram of under-power protection after modification

PT断线要闭锁正相低功率保护。

4.4 6 kV 低电压保护完善

当TV断线时6 kV低电压保护可能误动作,因此6 kV低电压保护加了PT断线闭锁。

4.5 500 kV 断路器断口闪络保护完善

对500 kV断路器断口闪络保护的完善,采取了将500 kV断路器断开的接点并联改为串联的措施。

修改原因如下:①当500 kV断路器CB32(42)、CB33(43)断开时,发电机与电网解列,此时发电机与电网将会失去同步,加在CB32、CB33断口上的电压最大将达到2E,此种状态发生闪络的可能性比较大。因此将两个断路器的接点串联作为断口闪络保护出口的必要条件更加符合现场状态。②当一个断路器断开,另一个断路器仍然处于合闸状态时(也就是逻辑修改之前两个断路器接点处于并联时的状态),由于发电机仍然与系统相连,加在断口的两端

电位是同相位。不会发生断口闪络,此时保护若误动,将会引起大面积停电。

综上所述将两个断路器由并联改为串联,使断路器断口闪络保护出口的可靠性得到了提高。

5 结束语

发变组保护是核电厂安全经济运行的重要组成部分,通过电气人员的调试,到目前为止,发变组保护正确动作多次,正确动作率达到100%。各项运行指标都正常。

参考文献:

- [1] DL400-91. 继电保护和自动装置技术规程[S].
- [2] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1976.
- [3] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [4] 杨奇逊. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1988.

收稿日期: 2002-11-06

作者简介:

查卫华(1978-), 男, 大学本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护工作;

王建成(1954-), 男, 工程师, 负责电气工作;

李德佳(1964-), 男, 高级工程师, 负责继电保护工作。

Application of WFB-100 microprocessor-based protection in Qinshan nuclear power station

ZHA Wei-hua, WANG Jian-cheng, LI De-jia

(Nuclear Power Qinshan Joint Venture Co., LTD, Haiyan 314300, China)

Abstract: NPQJVL is a commercial nuclear power station which is designed, constructed, Commissioned, and operated by China. Its generator-transformer protection used WFB-100 microprocessor-based protection system developed by XJ group corporation. From special requirements of large nuclear power station, analyze the configuration feature, relative logic and problem during commissioning of the generator-transformer protection.

Key words: generator-transformer protection; protection configuration; nuclear power station

(上接第68页)

Simulation analysis of characteristic for interphase power controller

LI Juan, LIU Xiu-kuan, JI Yan-chao, LIU Zhuo

(Department of electrical engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

Abstract: Based on the practical structure of IPC, The model of two network connected by single tie-line with IPC is built by the SIMULINK—a dynamic simulation tool in the MATLAB, and the dynamic characteristics are studied. The simulation results show that (1) Under the normal operation condition, the load flow of tie-line can be changed efficiently by switching different capacitors and reactors. (2) When short-circuit fault occurs on receiving side of tie-line, IPC have the good attributes—decoupling voltage and interconnected networks; however, when there is an open-circuit fault, the voltage of the sending network is easy to recede and the capacitor may generate over-voltage.

Key words: interphase power controller; dynamic characteristics; MATLAB; simulation analysis