

动态可控相间功率控制器的多性能协调控制策略

易善军, 于继来, 郭志忠

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

PERFORMANCES COORDINATION STRATEGIES OF DYNAMIC CONTROLLED INTER-PHASE POWER CONTROLLER (DCIPC)

YI Shan-jun, YU Ji-lai, GUO Zhi-zhong

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: The usual inter-phase power controller (IPC) is a static device, and has the unique properties of robust power flow control, short circuit currents limitation and voltage decoupling. Whereas there are many problems for IPC's applications, such as over voltage on the components of IPC, overflow of IPC's terminal voltages, decentralization of control parameters for fulfilling various operation requests, and difficulty in coordinating various operation requests. This paper proposes a principle configuration of IPC with dynamic control properties, the equivalent susceptances and phase shifting components of which can be changed continuously, termed as Dynamic Controlled Inter-phase Power Controller (DCIPC). Four control strategies of DCIPC are analyzed, which is based on global normal operation information, local normal operation information, local fault information, and for device going into and dropping out, respectively. Parameter-coordinating methods and schemes of control system are also analyzed based on the four control strategies. Case studies on test systems verify the feasibility of strategies and methods. All the work can direct the practical operation of IPC to improve performance and assist the operators to discover the problems in time and provides the appropriate solutions.

KEY WORDS: Power systems; FACTS; Power flow control; Inter-phase power controller (IPC); Dynamic controlled IPC (DCIPC); Coordination control

摘要: 常规相间功率控制器 (IPC) 是一种静态调节设备, 虽具有鲁棒潮流控制、短路电流限制和两端电压弱影响的良好特性, 但也存在设备过电压与安装点电压容易越限、各种运行性能要求下的控制参数分散性较大、不易实现多种运行性能的协调等问题。针对这些问题, 该文提出了一种动态可

控 IPC (DCIPC) 的原理结构, 使得常规静态 IPC 的等效电感、电容和移相环节变成一种连续动态可控的形式, 分析了它的 4 种控制策略: 基于系统全局正常运行信息的性能协调控制策略、基于设备就地局部正常运行信息的性能协调控制策略、基于就地局部事故状态信息的控制策略和设备投入与退出时的控制策略。并在此基础上, 分析了各种控制策略对应的参数协调方法以及控制系统的实施方案。数值仿真表明, 文中所提策略和方法是可行的, 能够动态地协调 DCIPC 的不同性能。既可指导 IPC 的实际运行, 提高其运行性能, 又可帮助控制人员发现运行中的矛盾, 及时提供解决问题的策略和方法。

关键词: 电力系统; 灵活交流输电系统; 潮流控制; 相间功率控制器 (IPC); 动态可控 IPC (DCIPC); 协调控制

1 引言

最初的相间功率控制器 (Inter-phase Power Controller, IPC) 仅由电感、电容和机械开关等常规器件组成^[1], 是一种静态调节设备。它在一定条件下具有鲁棒潮流控制、短路电流限制和 IPC 两端电压互不影响的良好特性, 被 IEEE/PES 列为适于开发应用的 3 种控制器之一^[2~6]。据文献 [7]~[9] 研究表明, 满足“控方主导”的参数选择 (电感和电容支路的电抗取值充分大) 是实现 IPC 上述特性的先决条件。然而, 过大的电抗取值又会降低线路功率的传输能力。另外, 不合适的参数选择还容易产生一些不良后果, 例如: ①控制器的过电压现象; ②控制器送、受端电压的越限问题; ③ IPC 电感和电容支路传输有功功率不均衡甚至形成异向环流、造成设备容量浪费的问题。这些问题阻碍了最初结构的 IPC 综合性能

的发挥，影响到其在高电压等级电网中的实际应用。

常规静态 IPC 很难做到在不同运行性能要求之间进行控制参数的快速切换。为了综合改善 IPC 的动态调控性能，使其良好的品性能够在克服或降低不良影响的前提下获得充分发挥，一方面可以从硬件结构上通过功率电子器件对其等效电感、电容和移相环节进行电子式改造，另一方面可以从调控策略和方法上对其性能进行协调。基于此认识，本文提出了一种动态可控 IPC (DCIPC) 的原理结构，使得常规静态 IPC 的等效电感、电容和移相环节变成一种连续动态可控的形式。针对 DCIPC，本文分析了 4 种控制策略及其参数协调方法，规划了整个控制系统的实施方案。这些工作既可指导 IPC 的实际运行，提高其运行性能，又可帮助控制人员发现运行中的矛盾，及时提供解决问题的策略和方法。

2 DCIPC 的原理结构

常规 IPC 电路模型的单线图如图 1 所示^[4]。其中，PST₁和PST₂为 2 个等效移相环节，jB₁和jB₂为 2 个等效支路导纳，其物理形式既可以是电容，也可以是电抗，视运行的具体情况而定。PST₁和jB₁串联连接、PST₂和jB₂串联连接，两者分别在送端节点SD和受端节点RC间并联连接。

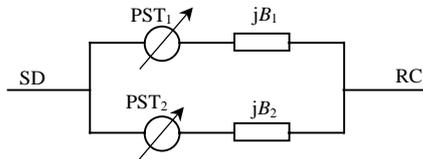


图 1 常规 IPC 的通用电路模型
Fig. 1 General circuit model of usual IPC

根据图 1 的电路形式，将等效移相环节和等效支路导纳进行电子式改造，即可使静态 IPC 变成动态可控的 IPC。图 2 给出了一种典型的 DCIPC 原理结构。其中，PST₁和PST₂有相同的主电路结构，是基于相控式可控硅开关技术实现连续移相调控的移相器，在一定范围内移相角度可连续调整^[10-11]。jB₁和jB₂也有相同的主电路结构，是由一个电容和一个受控的电感支路并联形成，与可控串联电容补偿器 (TCSC) 的结构相同。

DCIPC 的等效电路可用图 3 表示。其中，E_{PST1}和 E_{PST2} 分别为 PST₁ 和 PST₂ 通过串接变压器串入支路中的等效受控电势源，I_{PST1} 和 I_{PST2} 分别为 PST₁ 和 PST₂ 通过并接变压器从系统获得激励的等效受控电流源。设 E_{PST1} 和 E_{PST2} 与送端节点电压相量 V_{SD} 的幅

值比分别为 γ₁ 和 γ₂，领先的相位分别为 φ₁ 和 φ₂，这些参数具有特定的运行限值范围：γ_{imin} ≤ γ_i ≤ γ_{imax}，φ_{imin} ≤ φ_i ≤ φ_{imax}，i=1, 2。另外，受控的 B₁ 和 B₂ 也具有对应的参数运行范围：B_{imin} ≤ B_i ≤ B_{imax}，i=1, 2。

由于 DCIPC 具有动态调控能力，且相对于静态 IPC，DCIPC 省却了大电抗器，并可用更小或更少规模的电容器获得更宽的参数调节范围，因此 DCIPC 具有更大的调节灵活性，为采用多变的控制策略和参数协调方法提高其综合性能奠定了基础。

下面将对 DCIPC 的不同控制策略、参数协调方法以及相关的问题分别进行分析。

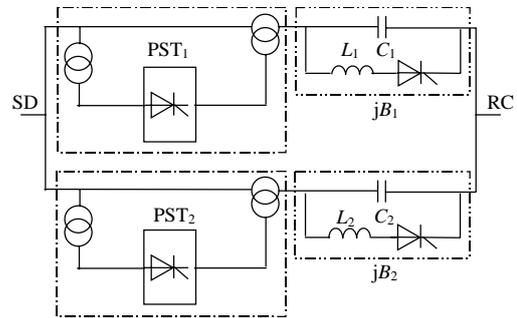


图 2 DCIPC 的原理结构
Fig. 2 Principle configuration of DCIPC

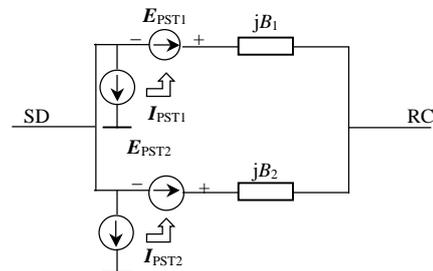


图 3 DCIPC 的等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit of DCIPC

3 系统全局正常运行的协调控制策略

3.1 控制策略

该控制策略是 DCIPC 参与系统正常运行调节时的策略，它首先需要通过调度控制中心的主服务系统、由远程信息通道搜集系统的全局信息（包括系统的网络运行情况、机组运行情况、负荷情况等），然后借助于能量管理系统的特定高级应用软件计算出 DCIPC 可行的运行参数定值，最后再将这种参数定值通过遥控的方式下载到 DCIPC 的就地控制子站，由子站控制其实际运行。

在正常运行方式下，系统的状态主要受负荷和重要线路（如联络线）输送功率计划值变化的影响。这是一种慢变过程，使得 DCIPC 可行的运行参数定值可在一定时间周期内适用。通常，这种控制策略

下的参数定值计算可每隔一定长度的时间段进行一次,例如5min、10min或其它固定时间,也可依照负荷和重要线路输送功率计划值的变化幅度自适应地调整计算的时间段落长度。

在正常运行方式下,DCIPC的主要功能是在满足特定约束的前提下适应系统潮流控制的需求。这时可不考虑事故隔离和限制短路电流的需求,因为这些需求将由其它控制策略和参数协调方法保证。

3.2 控制参数定值的计算

控制参数定值的计算可以归纳为如下优化问题的求解过程:

$$\text{目标函数为 } L = \max_{k=1}^{NC} \left| \frac{P_{lk} - P_{lk}^D}{P_{lk}^D} \right| \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{约束条件为 } \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$V_{SD\min} \leq V_{SD} \leq V_{SD\max} \quad (3)$$

$$V_{RC\min} \leq V_{RC} \leq V_{RC\max} \quad (4)$$

$$V_{Bi\min} \leq V_{Bi} \leq V_{Bi\max} \quad (5)$$

$$\gamma_{i\min} \leq \gamma_i \leq \gamma_{i\max} \quad (6)$$

$$\varphi_{i\min} \leq \varphi_i \leq \varphi_{i\max} \quad (7)$$

$$B_{i\min} \leq B_i \leq B_{i\max} \quad (8)$$

$$K_{P\min} \leq K_P \leq K_{P\max} \quad (9)$$

式(1)是所有DCIPC所在线路输送的有功功率与其期望值相对偏差的最大值,优化的结果要求该最大值实现最小化,其中, P_{lk} 、 P_{lk}^D 为第 k 个DCIPC所在线路输送的有功功率及其期望值, NC 是DCIPC的总数;式(2)是电力网络潮流方程约束,其中, \mathbf{X} 为网络状态变量向量,如节点电压的幅值和相位, \mathbf{U} 为DCIPC的控制参数向量,包括所有DCIPC的 γ_i 、 φ_i 和 B_i ($i=1, 2$);式(3)和(4)分别是所有DCIPC的送、受端节点电压幅值的上、下限值约束;式(5)是所有DCIPC的受控电纳 B_1 和 B_2 上的电压降落的上、下限值约束;式(6)~(8)是所有DCIPC的受控参数 γ_i 、 φ_i 和 B_i 的上、下限值约束;式(9)是受控电纳 B_1 和 B_2 上输送的有功功率之差与线路输送的有功功率期望值之比的上、下限值约束,其中,第 k 个DCIPC对应的分量为 $K_{Pk} = |P_{lk} - P_{lk}^D| / P_{lk}^D$ 。式(9)的作用在于控制 B_1 和 B_2 上输送的有功功率的均衡程度,避免出现两者差别较大甚至异向传输的不合理现象。

式(1)~(9)描述的优化问题可采取多种方法求解,如罚函数法、乘子罚函数法、牛顿法等。求得控制参数 \mathbf{U} 后,就可通过遥控方式下传到DCIPC的就地控制系统,作为控制参数整定值去进一步求

得可控器件的实际控制参数(如GTO的导通角等)。

4 设备就地局部正常运行的协调控制策略

4.1 控制策略

该控制策略也是DCIPC参与系统正常运行调节时的一种策略,它仅需就地测量一些信息,然后利用这些信息求得DCIPC的控制参数 γ_i 、 φ_i 和 B_i ($i=1, 2$)的定值。由于各DCIPC之间、DCIPC与系统其它控制设备之间没有直接信息交换,因此各设备的动作情况是相对独立的。尽管如此,系统中任一设备的调整又会间接影响到其它控制设备的运行条件,因此这时就需要不断地测量变化中的就地信息,然后快速地修改控制参数,以适应不断变化的运行状况。一般测量信号的采样频率可为几百Hz,而控制参数定值的修改周期可为30s或60s。

就地测量信息包括DCIPC所在线路及 B_1 和 B_2 上输送的有功功率 P_i 、 P_1 和 P_2 ; B_1 和 B_2 上的电压降落;DCIPC的送、受端节点电压。利用这些就地测量信息,就可以计算控制参数的定值(参见第4.2节)。视具体需要,可以将计算得到的控制参数定值通过远动系统上传到调度控制中心,作为统计和历史数据使用与保存。

4.2 控制参数定值的计算

控制参数定值的计算可以归纳为如下优化问题的求解过程:

$$\text{目标函数为 } L = |P_i - P_i^D| \rightarrow \min \quad (10)$$

$$\text{约束条件为 } V_{Bi\min} \leq V_{Bi} \leq V_{Bi\max} \quad (11)$$

$$\gamma_{i\min} \leq \gamma_i \leq \gamma_{i\max} \quad (12)$$

$$\varphi_{i\min} \leq \varphi_i \leq \varphi_{i\max} \quad (13)$$

$$B_{i\min} \leq B_i \leq B_{i\max} \quad (14)$$

$$K_{P\min} \leq K_P \leq K_{P\max} \quad (15)$$

式中 $K_P = |P_1 - P_2| / P_1^D$ 。

在调节DCIPC的控制参数使目标函数趋于优化的过程中, V_{SD} 、 V_{RC} 会发生变化并影响目标函数的取值。为了消除优化过程中 V_{SD} 、 V_{RC} 对目标函数取值的影响,可以将 V_{SD} 和 V_{RC} 强加一定的约束,例如令 $V_{SD}=V_{RC}=1$ (标么值)或某一定值,在此基础上对上述优化问题求解,可以获得DCIPC的控制参数取值。一般来说,IPC安装在变电站,在实际控制过程中,很容易对 V_{SD} 实施控制,使其维持在一定的水平上。只要 V_{SD} 维持在一定的水平上,那么按照约束条件 $V_{SD}=V_{RC}=1$ (标么值)或某一定值求得的控制参数就会使 V_{RC} 趋于维持在与 V_{SD} 接近的某一水平上。由

于在该控制策略下求取的控制参数的修正周期较短，而正常运行状态是一种比较慢的缓变过程，因此通过不断的参数修正，既可以确保控制目标的实现，又可以使 V_{SD} 和 V_{RC} 维持在合理的水平上。

5 设备就地局部事故状态的控制策略

5.1 控制策略

该控制策略是DCIPC参与系统事故控制的一种策略，它需要测量就地信息，快速做出判断，及时调整参数，起到限制短路电流、隔离故障的作用。

就地测量的信息包括：线路上输送的电流，DCIPC的送、受端节点电压 V_{SD} 和 V_{RC} ， B_1 和 B_2 上的电压降落 V_{B1} 和 V_{B2} 。依据线路上输送电流值的变化，可以快速地识别短路或断线故障的发生；依据 V_{SD} 和 V_{RC} 的变化，可以快速地识别引起电压急速下降的接地短路故障或因参数不合理和断线故障引起的DCIPC对端电压的急速下降；依据 V_{B1} 和 V_{B2} 的变化，可以快速地识别 B_1 和 B_2 的过电压问题。

5.2 控制参数定值的快速切换

当DCIPC设备内部发生故障或外部发生不对称故障时，情形较复杂。一种简单的做法就是在此情况下直接将DCIPC通过旁路短接，然后退出系统；另一种做法就是根据实际故障情况进行专门分析，然后采取相应的反事故策略（包括不对称调控策略）。鉴于篇幅，这部分内容将在另文专门探讨和发表。因此，下文主要针对DCIPC外部发生对称故障时的控制问题进行分析。

由文献[4]~[6]可知，对于调谐型IPC，当设备一侧线路发生三相接地短路故障时，流经该侧的电流具有恒流性质，而此时设备另一侧的电流等于0（相当于该侧等值系统空载或相当于该侧线路三相开断），从而完全隔断了一侧三相金属性接地短路对另一侧系统的影响。因此，当根据测量信息判断出线路发生短路故障时，可在一定条件下将DCIPC参数调节到调谐或接近调谐状态，以尽量降低短路故障对对侧系统的不良影响；对偶地，当设备一侧线路发生三相断线故障时，若DCIPC处于参数调谐状态，则会引起对侧系统的等效三相接地短路效应，应注意加以避免。下面将在具体的反事故DCIPC参数定值切换过程中考虑上述特性。

(1) DCIPC能量受端三相接地短路。此时，相当于图3能量受端RC侧在 t_0 时刻发生三相接地短路故障。设在 t_1 时刻RC侧线路保护动作跳开，故障暂

时消除，在 t_2 时刻线路重合，对瞬时性故障，线路重合后重新进入正常运行状态；对永久性故障，线路重合不成功，在 t_3 时刻线路重新跳开，促使故障消除。

在 $t_0 \sim t_1$ 时间区间内RC侧三相接地短路，此时要注意降低送端SD侧受到的不良影响。若要保持SD侧的电压和输送的功率与 t_0 时刻前的值相等或变化较小，则可推得DCIPC的参数应满足条件为

$$(P_{SD} - jQ_{SD})/V_{SD}^2 = jB_1(1 + \gamma_1^2 + 2\gamma_1 \cos \varphi_1) + jB_2(1 + \gamma_2^2 + 2\gamma_2 \cos \varphi_2) \quad (16)$$

式中 P_{SD} 和 Q_{SD} 为 t_0 时刻前的正常有功功率和无功功率； V_{SD} 为 t_0 时刻前的送端节点正常电压幅值。

按照式(16)及其它相关约束关系(例如式(11)~(14))可求得DCIPC的参数，当 t_0 时刻RC侧三相接地短路时，可快速地将故障前的控制参数切换到此时的控制参数值上。该控制参数可在故障发生前的正常运行阶段以滚动的方式计算出来以备用（当 P_{SD} 和 Q_{SD} 较小时，也可简单地将DCIPC调到某种调谐状态，使 $t_0 \sim t_1$ 时间区间内送端侧的功率降到0）；在 $t_1 \sim t_2$ 时间区间内，RC侧空载，此时可将DCIPC的控制参数切换到远离调谐状态，例如可将 B_1 和 B_2 全部调节到感性状态，使SD侧处于接近空载状态；在 t_2 时刻，随着线路的重合，将DCIPC的控制参数再次快速切换到 t_0 时刻之前的值上。对瞬时性故障，此时已经检测不到故障的存在，则DCIPC也随线路的重合成功而重新进入正常运行状态；对永久性故障，随着线路的再次跳开，DCIPC再次快速切换到 $t_1 \sim t_2$ 时间区间内的控制参数值上，并通过旁路开关短接后将DCIPC退出系统。

(2) DCIPC能量送端三相接地短路。此时相当于图3能量送端SD侧在 t_0 时发生三相接地短路故障。设在 t_1 时SD侧线路保护动作跳开，故障暂时消除，在 t_2 时线路重合，对瞬时性故障，线路重合后重新进入正常运行状态；对永久性故障，线路重合不成功，在 t_3 时线路重新跳开，促使故障消除。

在 $t_0 \sim t_1$ 时间区间内，SD侧三相接地短路，此时可将 B_1 和 B_2 全部调节到大电感状态，以降低RC侧受到的不良影响；在 $t_1 \sim t_2$ 时间区间内，SD侧空载，此时可将DCIPC的控制参数切换到远离调谐状态，例如可将 B_1 和 B_2 全部调节到感性状态，使RC侧处于接近空载状态；在 t_2 时刻，随着线路的重合，将DCIPC的控制参数再次快速切换到 t_0 时刻前的值上。对瞬时性故障，此时已经检测不到故障的存在，则DCIPC也随线路的重合成功而重新进入正常运行状态；对

永久性故障,随着线路的再次跳开,DCIPC再次快速切换到 $t_1 \sim t_2$ 时间区间内的控制参数值上,并通过旁路开关短接后将DCIPC退出系统。

(3) DCIPC能量受端或送端三相断线。此时,可将 B_1 和 B_2 全部调节到感性状态。然后通过旁路开关短接后将DCIPC退出系统。

6 设备投入与退出时的控制策略

在DCIPC正常投入的过程中,先将控制参数调节到等效阻抗较小的状态(例如移相环节的移相角均等于0,且 B_1 和 B_2 为小电感或小容抗),然后跳开DCIPC的旁路开关,将DCIPC投入线路,最后再根据实际调控需求将参数调节到适当的值上。

除了第5节特定事故状态下DCIPC需要退出系统外,DCIPC的正常检修也需要经过一定的退出操作过程:先将DCIPC所在线路的功率降到DCIPC退出系统运行时的值上,同时伴随着将DCIPC的控制参数调节到使其等效阻抗较小的状态,然后投入旁路,使线路功率通过旁路流通,最后断开DCIPC与线路之间的断路器,使DCIPC退出运行。

7 算例分析

7.1 算例条件

本文利用IEEE14、30、57、118节点和New England 10机39节点等系统对DCIPC正常运行时的协调控制策略进行了仿真分析。下面仅给出New England系统的算例结果。该系统数据和单线图见文献[12]。在本文仿真分析中,设DCIPC为电压插入型,移相环节的相位参数为 $\varphi_1 = -\varphi_2 = 90^\circ$ 。

为便于对比,表1首先给出New England系统3条支路上安装DCIPC但未经协调控制时的参数值以及相应的状态量。由表1可见:条件1时,电感和电容支路传输的有功功率方向相反;条件2时,电容支路传输的有功功率明显大于电感支路传输的有功功率;条件3时,电感支路传输的有功功率明显大于电容支路传输的有功功率。因此,在3种条件下,电感和电容支路传输的有功功率出现了不平衡甚至异向传输,造成了设备容量的浪费。另外,条件1、2的电容支路和条件3的电感支路上的电压降都较高,这对设备绝缘提出了较高的要求。

表1 协调控制前的DCIPC参数值
Tab. 1 The parameters of DCIPC without coordination pu

参数	条件1	条件2	条件3
	$L_{16} \sim L_{17}$	$L_{11} \sim L_6$	$L_3 \sim L_4$
γ_1	0.01108	0.14307	0.50000
γ_2	0.50000	0.50000	0.01000
B_1	-4.36920	-3.10601	-2.19423
B_2	4.97700	4.99852	1.00000
P_{ij}	2.74000	3.00000	1.10000
V_{B1}	0.03319	0.17966	0.50011
V_{B2}	0.54605	0.48958	0.04974
P_1	-0.10000	0.55394	1.07411
P_2	2.83937	2.44537	0.02550
V_{SD}	1.02306	1.03477	1.02760
V_{RC}	1.047876	1.00362	0.98481

7.2 基于系统全局正常运行信息的协调算例

约束条件为: $-5 \leq B_1 \leq -1$, $1 \leq B_2 \leq 5$, $0 \leq \gamma_1 \leq 0.5$, $0 \leq \gamma_2 \leq 0.5$, $0.9 \leq V_{RD} \leq 1.1$, $0.9 \leq V_{SD} \leq 1.1$, $-0.1 \leq K_P \leq 0.1$, $V_{B1} \leq 0.4$, $V_{B2} \leq 0.4$ 。表2给出了经过协调控制后的DCIPC参数值及相应的状态量。

表2 协调控制后的DCIPC参数值
Tab. 2 The parameters of DCIPC after coordination pu

参数	条件1	条件2	条件3	条件4		条件5		
	$L_{16} \sim L_{17}$	$L_{11} \sim L_6$	$L_3 \sim L_4$	$L_{16} \sim L_{17}$	$L_{11} \sim L_6$	$L_{16} \sim L_{17}$	$L_{11} \sim L_6$	$L_3 \sim L_4$
P_{ij}^f	2.74	3.00	1.10	2.74	3.00	2.74	3.00	1.10
P_{ij}	2.73998	3.00000	1.09999	2.73998	2.99989	2.73998	3.00009	1.09999
γ_1	0.37521	0.31213	0.15648	0.37080	0.31930	0.32841	0.32374	0.07904
γ_2	0.29233	0.35480	0.25677	0.31721	0.32319	0.22697	0.41572	0.14748
B_1	-4.16299	-4.37917	-3.44179	-4.14035	-4.43668	-4.30932	-3.90031	-4.97765
B_2	3.64822	4.49712	2.16453	3.45313	4.81037	4.93053	4.23849	4.43880
V_{B1}	0.34669	0.34760	0.15592	0.35006	0.34958	0.29216	0.35031	0.13403
V_{B2}	0.32838	0.32853	0.28703	0.34530	0.30013	0.28069	0.39474	0.16076
P_1	1.50254	1.52384	0.49570	1.50669	1.55454	1.32125	1.34992	0.51423
P_2	1.23691	1.47554	0.60415	1.23277	1.44473	1.41821	1.64955	0.58562
V_{SD}	1.00396	1.01309	1.03840	1.00431	1.01086	0.99979	1.00634	1.06224
V_{RC}	1.04496	1.00111	0.98620	1.04361	1.00229	1.07114	0.98839	0.97782

对比表1、2的前3个条件可见,相应条件下的DCIPC虽然传输相同的有功功率,但经过参数协调

后,电感和电容支路上传输的有功功率得到了均衡,且 2 条支路的电压降也有较大程度的降低,均在允许范围内。从表 2 的条件 4 和 5 可见,本文提出的基于系统全局正常运行信息的协调算法可同时协调多个 DCIPC。

7.3 基于系统局部正常运行信息的协调算例

约束条件为: $-5 \leq B_1 \leq -1$, $1 \leq B_2 \leq 5$, $0 \leq \gamma_1 \leq 0.5$, $0 \leq \gamma_2 \leq 0.5$, $-0.1 \leq K_P \leq 0.1$, $V_{B1} \leq 0.4$, $V_{B2} \leq 0.4$, $V_{SD} = 1$ 。表 3 给出了经过几次测量并协调控制后的 DCIPC 参数值以及相应的状态量。由表 3 可见,通过参数协调,可使送端、受端电压维持在要求的某一水平上。与表 1 对比可以看出,经参数协调,DCIPC 的各项参数指标也能满足系统提出的要求。

表 3 协调控制后的 DCIPC 参数值

Tab. 3 The parameters of DCIPC after coordination pu

参 数	条件 1	条件 2	条件 3
	$L_{16} - L_{17}$	$L_{11} - L_6$	$L_3 - L_4$
P_{ij}^r	2.74000	3.00000	1.10000
P_{ij}	2.73998	2.99994	1.09997
γ_1	0.32189	0.25449	0.19113
γ_2	0.28056	0.34697	0.13266
B_1	-4.41990	-5.00000	-2.88331
B_2	4.29032	4.99025	4.16142
V_{B1}	0.29332	0.28695	0.17783
V_{B2}	0.31570	0.31452	0.14851
P_1	1.34478	1.43263	0.49819
P_2	1.39456	1.56665	0.60102
V_{SD}	1.00000	1.00000	1.00000
V_{RC}	1.04507	0.99889	0.97981

8 结论

(1) 本文提出了一种动态可控的 IPC (DCIPC) 原理结构,并提出了 4 种控制策略。

(2) 分析了各种控制策略对应的参数协调方法以及控制系统的实施方案。

(3) 算例表明所提策略和方法是可行的,能够动态地协调 DCIPC 的不同控制性能。

参考文献

- [1] Brochu J, Pelletier P, Beaugard F *et al.* The interphase power controller: a new concept for managing power flow within AC networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 833-841.
- [2] Beaugard F, Brochu J, Morin G *et al.* Interphase power controller with voltage injection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(4): 1956-1962.
- [3] Sybille G, Haj-Maharsy Y, Morin G *et al.* Simulator demonstration of the interphase power controller technology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1985-1992.

- [4] 于继来, 柳焯. 相间功率控制器的稳态分析及其与移相器的特性比较[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 25-34.
Yu Jilai, Liu Zhuo. Steady-state analysis of interphase power controller and its characteristic comparison to phase shifter[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 25-34.
- [5] 戴朝波, 武守远, 周孝信, 等. 调谐型相间功率控制器的稳态特性研究[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 23-27.
Dai Chaobo, Wu Shouyuan, Zhou Xiaoxin *et al.* Study on steady-state characteristics of tuned interphase power controller[J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 23-27.
- [6] 李娟, 刘修宽, 曲祖义, 等. 负荷频率变化时 IPC 及其两侧电网的动态行为[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 71-75.
Li Juan, Liu Xiukuan, Qu Zuyi *et al.* Dynamic behavior of IPC and power system on both sides considering the variation of load frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 71-75.
- [7] 柳焯. 相间功率控制器运行状态分析[J]. 清华大学学报, 1999, 39(3): 69-71.
Liu Zhuo. Operation state analysis of interphase power controller[J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(3): 69-71.
- [8] 曲祖义, 于继来, 柳焯. 相间功率控制器控制机理的电路解析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 37-40.
Qu Zuyi, Yu Jilai, Liu Zhuo. Circuit analysis for the mechanism of interphase power controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 37-40.
- [9] 刘修宽, 刘彦, 李娟, 等. 基于电网互联的 IPC 参数选取问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 64-67.
Liu Xiukuan, Liu Yan, Li Juan *et al.* IPC parameters selection based on power system interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 64-67.
- [10] Arnold C P, Duke R M, Arrillaga J. Transient stability improvement using thyristor controlled quadrature voltage injection[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(3): 1382-1388.
- [11] Nyati S, Eitzmann M, Kappenman J *et al.* Design issues for a single core transformer thyristor controlled phase-angle regulator[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1995, 10(4): 2013-2019
- [12] Pai M A. Energy function analysis for power system stability[M]. Kluwer Academic Publishers, University of Illinois at Champaign/Urbana, 1989.

收稿日期: 2004-10-08。

作者简介:

易善军 (1975-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统潮流控制与 FACTS 方面的研究工作;

于继来 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究工作;

郭志忠 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制、电力系统信息安全方面的研究工作。