

特高压互联电网联络线功率控制 (二) AGC 性能评价

高宗和¹, 陈刚², 滕贤亮¹, 张小白¹, 姚建国¹

(1. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003; 2. 国家电力调度通信中心, 北京市 100031)

摘要: 结合中国 1 000 kV 特高压交流试验示范工程的实际情况, 提出了一种适应特高压联络线功率控制的新的自动发电控制 (AGC) 性能评价指标, 称之为“责任度”, 以正确评价华北和华中电网对特高压联络线功率波动应承担的责任和所做出的贡献, 在特高压线路投运后取得了良好的实际应用效果。在此基础上, 进一步提出了一套以联络线功率为控制目标的新的 AGC 性能评价标准, 称之为“T 标准”。最后, 针对即将形成的华北、华中和华东特高压同步电网的特点, 对 A 标准、CPS 标准和 T 标准的应用进行了初步探讨。

关键词: 特高压同步电网; 自动发电控制; 责任度; A 标准; CPS 标准; T 标准

中图分类号: TM761; TM73

0 引言

北美电力可靠性委员会 (NERC) 先后提出了 2 套互联电网有功功率控制性能评价标准: A1/A2 标准 (简称 A 标准) 和 CPS 标准^[1-8]。A 标准规定区域控制误差 (ACE) 在任意 10 min 内至少过 0 值一次, 其实质是引导各控制区始终维持 ACE 在 0 值附近, 从而导致自动发电控制 (AGC) 机组的频繁调节。更重要的是, 只要一个控制区不能满足 A 标准, 系统频率和联络线功率就会产生偏差。正是由于 A 标准的这些缺陷, NERC 于 1996 年推出了 CPS 标准。CPS 标准引导各控制区以频率质量为控制目标, 鼓励各控制区之间的相互支援, 以发挥互联电网的优势。同时, CPS 标准不要求 ACE 过 0 值, 减少了 AGC 机组的不必要调节。CPS 标准的实施对提高频率质量起着重要的作用, 但随之而来的问题是, 联络线功率偏差加大。因此 A 标准和 CPS 标准都不宜直接应用于对联络线功率控制效果的评价。

为了提高连接华北和华中两大电网的长治—南阳—荆门特高压试验示范工程联络线功率波动的控制效果, 需要研究一套与之相适应的控制性能评价指标, 正确评价华北和华中电网对特高压联络线功率波动应承担的责任和所做出的贡献。更重要的是, 中国将于 2012 年建成“三华” (华北、华中、华东) 特高压互联电网, 研究与之相适应的有功功率控制

性能评价标准是当前面临的新课题。

1 用于性能评价的 ACE 计算

结合特高压交流试验示范工程的实际情况, 用图 1 所示的 2 个区域互联电网来研究联络线功率偏差与 ACE 的关系。

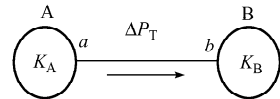


图 1 两区域互联电网

Fig. 1 Interconnected system of two region grids

设 ΔP_T 为联络线功率偏差 (定义由 A 到 B 为正方向), Δf 为系统实际频率与额定频率之差, K_A 和 K_B 分别为区域 A 和 B 的频率偏差系数。在联络线频率偏差控制 (TBC) 模式下, 控制区 A 和 B 的 ACE 记为:

$$\begin{cases} E_{A\text{-side}} = K_A \Delta f + \Delta P_T \\ E_{B\text{-side}} = K_B \Delta f - \Delta P_T \end{cases} \quad (1)$$

令 $K_\Sigma = K_A + K_B$, 从式 (1) 可得:

$$\Delta P_T = \frac{K_B E_{A\text{-side}} - K_A E_{B\text{-side}}}{K_\Sigma} \quad (2)$$

图 1 中, 将线路 ab 看做是连接华北和华中电网的特高压线路, 则 $E_{A\text{-side}}$ 和 $E_{B\text{-side}}$ 分别表示特高压联络线华中侧和华北侧电网的 ACE。华中侧电网由华中电网和其外部电网组成, 外部电网包括国调直调电厂和跨区直流线路, 华北侧电网也是如此。因此, 用 ΔW_A 和 ΔW_B 分别表示华中和华北电网的外网有功偏差, 则华中和华北电网的 ACE 可以表示为:

$$\begin{cases} E_A = E_{A\text{-side}} + \Delta W_A \\ E_B = E_{B\text{-side}} + \Delta W_B \end{cases} \quad (3)$$

式中： E_A 完全反映了华中电网的有功不平衡功率，与外部电网无关。

由文献[9]可知， E_A 完全反映了华中电网的有功不平衡功率，与外部电网无关。因此，控制 E_A 在 0 值附近是华中电网应尽的义务；另一方面，当外部电网出现有功偏差时，华中电网对其进行功率支援，其支援量在 E_A 中正确地反映出来。华北电网也是如此。所以，用 E_A 和 E_B 评价华中和华北电网的实际控制效果非常公正。

2 责任度指标的定义

从式(2)可以看出，联络线交换功率偏差是由华中电网 E_A 和华北电网 E_B 共同决定的，并且 E_A 和 E_B 对联络线交换功率的影响是不同的。参照式(2)，定义 1 min 区域 A 和 B 的责任度指标如下：

$$\eta_{A-1\text{-min}} = \frac{2K_B}{K_\Sigma} \frac{E_{A-1\text{-min}} \Delta P_{T-1\text{-min}}}{L_p^2} \quad (4)$$

$$\eta_{B-1\text{-min}} = \frac{2K_A}{K_\Sigma} \frac{E_{B-1\text{-min}} (-\Delta P_{T-1\text{-min}})}{L_p^2} \quad (5)$$

式中： $E_{A-1\text{-min}}$ 和 $E_{B-1\text{-min}}$ 分别为 E_A 和 E_B 在 1 min 内的平均值； $\Delta P_{T-1\text{-min}}$ 为 ΔP_T 在 1 min 内的平均值； L_p 为特高压联络线功率的控制精度，目前取 300 MW；常数 2 同时放大了区域 A 和 B 的责任度，对评价结果没有影响，只是为了使责任度的合格门槛正好等于 1(详见下面的描述)。

从式(4)可以看出，如果 $\eta_{A-1\text{-min}} > 0$ ，表示 $E_{A-1\text{-min}}$ 与 $\Delta P_{T-1\text{-min}}$ 同号，说明华中电网在该 1 min 内对联络线功率波动负有责任；如果 $\eta_{A-1\text{-min}} < 0$ ，表示 $E_{A-1\text{-min}}$ 与 $\Delta P_{T-1\text{-min}}$ 反号，说明华中电网在该 1 min 内对抑制联络线功率波动做出了贡献。 $E_{A-1\text{-min}}$ 与 $\Delta P_{T-1\text{-min}}$ 绝对值越大，责任或贡献的程度越大。

正常情况下，国调直调电厂和跨区直流线路都严格地执行计划，即 $\Delta W_A = \Delta W_B = 0$ 。这样，将式(4)与式(5)相加，并结合式(2)和式(3)，可以得出：

$$\eta_{A-1\text{-min}} + \eta_{B-1\text{-min}} = 2 \left(\frac{\Delta P_{T-1\text{-min}}}{L_p} \right)^2 \quad (6)$$

从式(6)可以看出，当 $\Delta W_A = \Delta W_B = 0$ 时，特高压联络线功率波动一定是由华中和华北电网引起的，因此有 $\eta_{A-1\text{-min}} + \eta_{B-1\text{-min}} \geq 0$ 。但只要能保证 $\eta_{A-1\text{-min}} + \eta_{B-1\text{-min}} < 2$ ，就必然有 $|\Delta P_{T-1\text{-min}}| < L_p$ ，因此，将责任度大于 1 定义为不合格。

定义一段时间(1 h, 1 d, 1 月, 1 a, 用 T 表示)内的责任度为：

$$\eta_{A-T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{A-1\text{-min}}(i) \quad (7)$$

定义 T 时间段内责任度的合格率为：

$$r_{A-T} = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (8)$$

式中： n 为 T 时间段内特高压联络线联网运行的时间(如分钟数)； m 为责任度小于 1 的分钟数。

3 责任度指标的实际应用情况

特高压交流试验示范工程投运后，国家电力调度通信中心用责任度指标对华中和华北网调的控制效果进行评价。表 1 列出了 2009 年 3 月几个典型 1 min 的责任度指标。华中和华北电网的 K 系数分别取 4 800 MW/Hz 和 7 200 MW/Hz。

表 1 华中和华北电网典型 1 min 的责任度
Table 1 The typical clock-minute RDI

日期	时间	联络线 偏差	华中 ACE	华北 ACE	华中 责任度	华北 责任度
2009-03-20	08:10	301	69	-643	0.277	1.721
2009-03-06	10:05	310	473	-51	1.951	0.141
2009-03-07	12:09	356	311	-420	1.480	1.330
2009-03-09	05:58	104	353	288	0.488	-0.265
2009-03-14	22:03	-326	85	-2	-0.368	-0.005

表 1 中，20 日 08:10 由华北电网承担主要责任；6 日 10:05 由华中电网承担主要责任；7 日 12:09 华北和华中电网承担的责任基本相当。

9 日 05:58 华北和华中电网虽然存在较大的 ACE，但由于 2 个 ACE 同号，引起联络线功率的偏差并不大，但频率偏差 1 min 的平均值达到 0.055 Hz。

14 日 22:03，由于山峡电厂一台出力 650 MW 的机组跳机，造成较大的联络线功率偏差，这不属于华北和华中电网的责任。此时，华中网调增加直调电厂出力，使 ACE 最大值达到 212 MW，1 min 平均值为 85 MW，为联络线功率恢复做出了贡献，责任度为负值。

当国调直调电厂和跨区直流线路都严格执行计划时，华北和华中电网的责任度之和能很好地反映特高压联络线功率的控制效果。图 2 中将 2009 年 2 月华北和华中电网每天的责任度之和、每天的联络线功率偏差超过 300 MW 的时间占特高压线路联网运行时间的比进行了对比。

4 联络线功率控制性能评价标准

虽然责任度评价指标是针对特高压交流试验示范工程联络线控制的要求提出来的，但可以进一步推广到任意互联电网，作为联络线功率控制性能评价标准，命名为 T(tie-line)标准。T 标准包括 I 类控制性能评价标准(简称 T1 标准)和 II 类控制性能

评价标准(简称 T2 标准)。

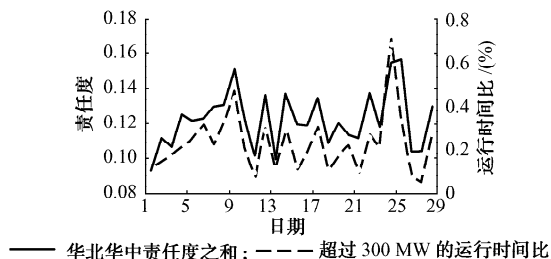


图 2 2009 年 2 月的 2 条曲线对比
Fig. 2 Comparison of the two curves in February, 2009

将任一互联电网等效为图 3 所示两区域电网,区域 i 表示互联电网中的任一控制区,其余所有控制区等效为区域 r,断面 T 由区域 i 和区域 r 之间的所有联络线构成。

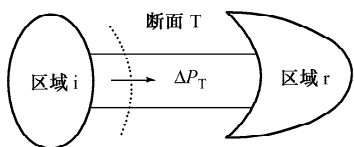


图 3 等效为两区域的互联电网
Fig. 3 Power system equivalent to two region grids

区域 i 和区域 r 的频率偏差系数分别用 K_i 和 K_r 表示,互联电网总的频率偏差系数用 K_Σ 表示, $K_\Sigma = K_i + K_r$, ΔP_T 为区域 i 的净交换功率偏差,则区域 i 的 ACE 可以表示为:

$$E_i = K_i \Delta f + \Delta P_T \quad (9)$$

T1 标准要求区域 i 在任一时间段内平均值 (avg) 始终满足:

$$\text{avg} \left(\frac{K_r}{K_\Sigma} E_{i-1-\min} \Delta P_{T-1-\min} \right) \leq L_T^2 \quad (10)$$

式中: $E_{i-1-\min}$ 为 1 min 的 E_i 平均值; $\Delta P_{T-1-\min}$ 为 1 min 的 ΔP_T 平均值; L_T 为区域 i 对外净交换功率的控制精度。

区域 i 的 T1 指标计算公式为: $(2 - C_i) \times 100\%$, 其中 C_i 表示一致性因子,则各时段 C_i 的统计公式为:

$$C_i = \frac{1}{L_T^2} \text{avg} \left(\frac{K_r}{K_\Sigma} E_{i-1-\min} \Delta P_{T-1-\min} \right) \quad (11)$$

通过上述定义,可得到 1 min, 10 min, 1 h, 1 d, 1 月, 1 a 的 T1 指标统计公式。

不失一般性,假设断面 T 的两侧电网由多个控制区共同构成,某一侧电网 i 包括 N 个区域,如图 4 所示。

定义 $E_i = \sum_{k=1}^N E_k$, 并代入式(11),即可得到 N 个区域总的一致性因子 C_i 。如果 $E_{k-1-\min}$ ($k=1, 2,$

$\dots, N$) 符号都相同,则按 $|E_{k-1-\min}|/K_k$ ($k \in N$) 的比例分摊 C_i , 得到 C_k ; 否则,按以下步骤计算 C_k :

1) 将 N 个区域分成与 $\Delta P_{T-1-\min}$ 同号的集合 N_1 和反号的集合 N_2 , 其 ACE 的 1 min 平均值之和分别用 $E_{N_1-1-\min}$ 和 $E_{N_2-1-\min}$ 表示。

2) 假设集合 N_2 中的各区域对抑制联络线功率波动没有做出贡献,即 $E_{N_2-1-\min} = 0$, 则联络线的功率偏差将增加到:

$$\Delta P_{T-1-\min}' = \Delta P_{T-1-\min} - \frac{K_r}{K_\Sigma} E_{N_2-1-\min}$$

此时总的一致性因子(用 C_i' 表示)为:

$$C_i' = \frac{1}{L_T^2} \text{avg} \left(\frac{K_r}{K_\Sigma} E_{N_1-1-\min} \Delta P_{T-1-\min}' \right)$$

3) 将集合 N_1 中的各区域按 $|E_{k-1-\min}|/K_k$ ($k \in N_1$) 的比例分摊 C_i' , 将集合 N_2 中的各区域按 $|E_{k-1-\min}|/K_k$ ($k \in N_2$) 的比例分摊 $C_i - C_i'$, 从而得到各区域的 C_k ($k \in N$)。

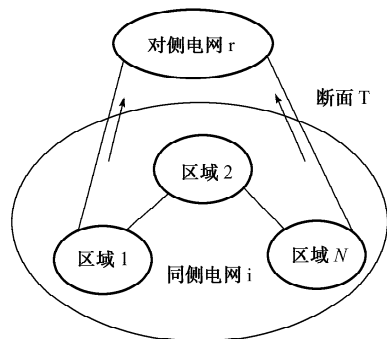


图 4 多区域构成的互联电网
Fig. 4 Multi control areas in an interconnected system

最后,计算各区域的 T1 指标。

类似于 CPS1 标准, T1 标准有 200% 和 100% 两个关键点:

1) 当 T1 指标大于 200%, 说明在该段时间内, 控制区对抑制联络线功率波动有贡献。

2) 当 T1 指标在 100% ~ 200% 之间, 说明在该段时间内, 控制区对联络线功率波动有责任, 但其责任未超过允许的程度。

3) 当 T1 指标小于 100%, 说明在该段时间内, 控制区对联络线功率波动有责任, 其责任超过了所允许的范围。

在 100% 和 200% 这 2 个关键点中, 100% 这个关键点是相对的, 它与参数 L_T 的取值有关; 而 200% 这个关键点则是绝对的, 它是区分控制区对联络线功率控制有贡献还是有责任的“分水岭”。

T2 标准与 CPS2 标准相同, 要求区域 i 在 10 min 内 ACE 平均值的绝对值应控制在规定的范围 L_{10} 之内, L_{10} 的取值同 CPS2 标准, 即

| avg(E_i) | ≤ L₁₀ (12)

表 2 任意选取 2009 年 3 月 14 日 06:50 到 07:00 的实际运行数据,列出了华中和华北电网的责任度和 T1 指标,特高压联络线的 L_T 均取 100 MW。

表 2 某个 10 min 华中和华北的责任度和 T1 指标
Table 2 RDI and T1 for CCPG and NCPG

时间	联络线 偏差	华中 ACE	华北 ACE	华中 责任度	华北 责任度	华中 T1	华北 T1
06:51	-143	-53	292	0.101	0.371	155	33
06:52	-96	38	314	-0.048	0.267	222	79
06:53	-154	-129	202	0.265	0.276	81	76
06:54	-67	46	242	-0.041	0.144	218	135
06:55	-199	-118	328	0.314	0.581	59	-61
06:56	-109	-56	189	0.082	0.182	163	118
06:57	-54	42	200	-0.030	0.095	214	157
06:58	-156	-183	108	0.380	0.150	29	133
06:59	-52	-106	-40	0.073	-0.020	167	208
07:00	-25	23	95	-0.008	0.021	203	191
平均	-105	-49.6	193	0.109	0.207	151	107

5 “三华”电网评价标准初探

上面介绍的 T 标准,与 A 标准和 CPS 标准一起,构成互联电网有功功率控制 3 个平行的性能评价标准,但其侧重点各有不同:

1)A 标准强调各控制区严格实现本区域有功功率的平衡,各控制区之间缺乏必要的支援。

2)CPS 标准以系统频率为控制目标,鼓励各控制区对恢复系统频率提供支援,这是以加大联络线功率偏差为代价的。

3)T 标准以联络线功率为控制目标,鼓励各控制区对恢复联络线功率提供支援,当联络线对侧控制区存在功率缺额时,本侧控制区的功率支援将加大系统频率的偏差。

A 标准不能发挥互联电网相互支援的优势,不推荐使用。CPS 标准和 T 标准都强调互联电网的相互支援,但由于侧重点不同,要结合互联电网的控制要求合理使用。

“三华”(华北、华中、华东)特高压同步电网形成后,在保证系统频率质量的同时,往往需要将部分区域电网以及省级电网之间的联络线(包括特高压线路)净交换功率控制在一定的范围内,以保证电网的安全稳定运行。因此,“三华”电网各控制区可以根据电网运行要求,一部分采用 CPS 标准,一部分采用 T 标准。

为了便于对“三华”电网各控制区统一进行考核和评价,必须使 CPS1 指标与 T1 指标具有可比性。可以采取如下几种方案:

1)适当调整评价指标中的相关参数,使任意时间段内的 CPS1 指标与 T1 指标直接可比。

2)将某一时间段内的 CPS1 指标和 T1 指标按其大小划分为“优”、“良”、“中”、“差”等 4 个等级,使不同指标下的等级具有可比性。

3)对每个 1 min,若 CPS1 指标或 T1 指标大于 100%,记该 1 min 为合格点,计算某一时间段内的 CPS1 指标和 T1 指标的合格率,使不同指标下的合格率具有可比性。

6 结语

根据本文研究成果,国家电力调度通信中心制定了《1 000 kV 长治—南阳—荆门特高压联络线功率控制管理规定及评价办法(暂行)》,并于 2008 年 12 月颁布实施,取得了良好的效果。

参考文献

[1] 电力系统调频与自动发电控制编委会. 电力系统调频与自动发电控制. 北京:中国电力出版社,2006.

[2] 汪德星. 华东电网实行 CPS 标准的探索. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 41-44.

WANG Dexing. Study of CPS standards in East China power grid. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 41-44.

[3] Performance standard training document [EB/OL]. [2009-02-02]. <http://www.nerc.com/>.

[4] Policy 1—generation control and performance [EB/OL]. [2009-02-02]. <http://www.nerc.com/>.

[5] NERC. Standard BAL-001-control performance standard [S/OL]. [2008-10-20]. <http://www.nerc.com/>, 1996.

[6] YAO Maojun. North American Electric Reliability Council’s new control performance standard oriented automatic generation control [D]. Arlington, TX, USA: University of Texas at Arlington, 2000.

[7] JALEELI N, VANSLYCK L S. NERC’s new control performance standards. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1092-1099.

[8] TETSUO S, DYNAMIC K E. Analysis of generation control performance standards. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 806-811.

[9] 高宗和,陈刚,杨军峰,等. 特高压互联电网联络线功率控制: (一)AGC 控制策略. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 51-55.

GAO Zonghe, CHEN Gang, YANG Junfeng, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid: Part one AGC control strategies. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 51-55.

高宗和(1962—),男,通信作者,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统分析和控制。E-mail: gaozh@naritech.cn

陈刚(1972—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统调度计划专业管理和研究。

滕贤亮(1978—),男,工程师,主要研究方向:自动发电控制和负荷预报的研究和开发。

(下转第 101 页 continued on page 101)

Active Power Control for Tie-lines in UHV Interconnected Power Grid

Part Two AGC Performance Assessment

GAO Zonghe¹, CHEN Gang², TENG Xianliang¹, ZHANG Xiaobai¹, YAO Jianguo¹

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. National Electrical Power Dispatching and Communication Center, Beijing 100031, China)

Abstract: Combined with 1 000 kV AC transmission pilot project in China, a new automatic generation control (AGC) performance assessment index suitable for the UHV AC tie-line active power control, named responsibility degree index (RDI), is provided to correctly evaluate the responsibilities of North China power grid and Central China power grid for the power fluctuation on the UHV AC tie-lines as well as their contributions to the fluctuation. The application of RDI to the commissioned UHV AC tie-lines show that it has achieved the favorable control performance. On this basis, a new AGC performance standard, named Standard T, is further proposed based on RDI. At last, considering the characteristics of the soon completed UHV synchronous North, Central and East China power grid, a preliminary discussion is made on the practical applications of CPC, CPS and Standard T.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGTGY[2009]622).

Key words: ultra high voltage (UHV) synchronized power grid; automatic generation control (AGC); responsibility degree index; CPC; CPS; Standard T