

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.15.011

CPS 及其考核在北美与国内的应用比较

巴 宇, 刘 烧, 李卫东

(大连理工大学电气工程学院, 辽宁省大连市 116024)

摘要: 目前, 中国大部分区域电网已经使用控制性能标准(CPS)进行互联电网有功功率控制性能的评价与考核。在引入标准时, 国内电网并非完全照搬北美的评价考核模式, 而是进行了改进。主要修改包括: CPS1 指标值使用短期分段平均算法、放弃直接使用 CPS2 考核、使用惩罚返还的考核规则等。从理论分析和定量测算 2 个方面着手, 分析比较了修改后的 CPS 在互联电网评价与考核应用中与北美的差异, 并较为详尽地分析了这些差异可能给最终考核带来的影响。此外, 也尝试理清控制性能评价中所涉及的相关概念。

关键词: 互联电网; 控制性能标准(CPS); 控制性能评价; 控制性能考核; 自动发电控制(AGC)

0 引言

在互联电网运行中, 需要控制性能评价标准和相应的考核规则来评价和规范各控制区域的行为, 使其既能满足系统的可靠性要求, 又能公平地分享电网互联所带来的益处。

北美自 1997 年起推行的控制性能标准(CPS)是电力可靠性标准集(reliability standards set)中的一部分, 该可靠性标准集包含 14 个可靠性标准, 其中的 BAL(resource and demand balancing)标准主要针对有功功率平衡。CPS 为 BAL 标准中的子标准, 编号为 BAL-001-0.1a, 主要用来评价区域实时功率平衡的控制性能。这个标准的制定目标是通过实时地控制发电功率与负荷功率平衡, 从而使互联电网稳态频率的统计指标低于一个事先指定的限值。该标准包含 2 个评价指标, 分别称为 R1 和 R2, 即通常所说的 CPS1 和 CPS2^[1-3]。

目前, 中国各大区域电网也已采用 CPS 进行互联电网运行控制的评价。以华东电网为例, 华东电网在北美推行 CPS 后不久, 就开始了 CPS 取代之前使用的 A 标准的研究工作, 并很快投入考核运行。CPS 实施后, 华东电网的频率质量(特别是 ± 0.1 Hz)的合格率有了明显的提高^[4]。

目前, 国内相关文献在提及 CPS 优越性时, 一般直接引用北美结论^[5-8], 而国内所使用的标准则是对北美模式进行了相当程度的修改。那么修改后的 CPS 是否仍具备北美结论, 修改对标准及考核有何

影响? 本文尝试从理论分析与数据测算 2 个方面明确上述问题。

1 北美 CPS 及其考核

1.1 北美 CPS

CPS1 要求每个平衡机构(balancing authority)(相当于中国的省级电网调度部门)应该控制所在区域的发电功率与其负荷功率平衡, 并应保证该区域的区域控制偏差(ACE)在 1 min 内的平均值应该在特定限值以内。这个限值用 ϵ_1^2 表示, 代表互联电网稳态频率偏差的长期统计目标限值, 且由北美电力可靠性集团(NERC)设定。每个互联电网中所有平衡机构使用相同的 ϵ_1^2 值。不同互联电网的 ϵ_1^2 值应分别计算。

CPS1 评价指标值可表示为:

$$I_{\text{CPS1}} = \left(2 - \frac{C_F}{\epsilon_1^2}\right) \times 100\% \quad (1)$$

$$C_F = A_{\text{avg}} \left(\frac{E_{\text{ACE, avg-1min}} \Delta F_{\text{avg-1min}}}{-10 B_{\text{avg-1min}}} \right) \quad (2)$$

式中: I_{CPS1} 为 CPS1 指标值; $E_{\text{ACE, avg-1min}}$ 为被考核区域的 ACE 在 1 min 内的平均值; $B_{\text{avg-1min}}$ 为被考核区域频率偏差系数在 1 min 内的平均值, 其为负值; $\Delta F_{\text{avg-1min}}$ 为互联电网频率偏差在 1 min 内的平均值; ϵ_1 为长期频率统计目标值; A_{avg} 为对当前考核点以前 12 个月的所有数据求平均值的函数。

CPS2 要求每个平衡机构应该控制本区域实时发电功率, 使每个考核周期的 ACE 在 10 min 内的均值小于特定限值(L_{10})的概率不小于 90%。

CPS2 评价指标值可表示为:

$$I_{\text{CPS2}} = P(E_{\text{ACE, avg-10min}} \leq L_{10}) \quad (3)$$

收稿日期: 2011-08-10; 修回日期: 2012-05-24。

国家自然科学基金资助项目(50577002)。

$$L_{10} = 1.65\epsilon_{10} \sqrt{(-10B_i)(-10B_s)} \quad (4)$$

式中： I_{CPS2} 为 CPS2 的指标值； $P(\cdot)$ 为概率计算公式，最终转化为百分数； $E_{ACE,avg-10min}$ 为被考核区域的 ACE 在 10 min 内的平均值； ϵ_{10} 为互联电网 1 a 内的 10 min 频率平均偏差的均方根值，其为定值（在同一互联电网中各区域使用相同的 ϵ_{10} ）； B_i 为被考核区域 i 的频率偏差系数； B_s 为所有区域频率偏差系数之和，对于使用时变 B 系数的区域，此值为最小的频率偏差系数之和。

与 CPS1 不同的是，CPS2 中没有使用长期滚动平均的计算方法，每月 CPS2 指标的计算仅使用当月 ACE 数据。

1.2 北美 CPS 考核

北美 CPS1 的考核周期为 1 个月，即只在每月末计算 CPS1 指标值（但该指标值计算所涉及的数据是历时 1 a 的），若合格（ $\geq 100\%$ ）则不处罚，亦不奖励；若不合格，则按照表 1 中的 CPS1 越限级别分级，作为处罚依据，具体处罚量由公开的协商决定。

表 1 北美 CPS1 越限级别
Table 1 CPS1 over bound level of North America

级别	CPS1 指标值区间
一级	95%~<100%
二级	90%~<95%
三级	85%~<90%
四级	<85%

CPS2 的考核周期也为 1 个月，即只在每月末计算 CPS2 指标值，若合格（ $\geq 90\%$ ）则不处罚，亦不奖励；若不合格，则按照表 2 中的 CPS2 越限级别分级，作为惩罚依据，具体处罚量由公开的协商决定。

表 2 北美 CPS2 指标越限级别
Table 2 CPS2 over bound level of North America

级别	CPS2 指标值区间
一级	85%~<90%
二级	80%~<85%
三级	75%~<80%
四级	<75%

2 国内 CPS 及其考核

国内各大电网所使用的指标与考核标准均基本相似，只在具体细节上有所区别。因此，本文将国内 CPS 及其考核作为一个整体，以华东电网为例进行介绍。

2.1 国内 CPS

国内 CPS1 评价指标值的公式与北美的（式（1））结构相同，但将年滚动平均计算改为了 10 min/15 min 的短期分段平均计算。

国内的 CPS2 指标与北美 CPS2 指标相同，但国内并未直接使用这个指标进行考核，而只是借用了 CPS2 限值 L_{10} 以计算惩罚量的大小，在此不再介绍。

2.2 国内 CPS 考核

相对于北美，国内的 CPS 考核就明显复杂得多。从时间周期上看，国内可以分出考核周期与结算周期 2 个概念。从指标考核上看，国内将 CPS1 和 CPS2 指标合并考核而非独立考核；从考核过程来看，国内又可分为考核、结算和返还 3 个阶段。

2.2.1 考核周期与结算周期

国内考核与实际惩罚使用不同周期运作，于是便产生考核周期与结算周期的概念。考核周期，即评价指标产生周期，也即计算合格点/不合格点的周期。华东、南方电网考核周期为 10 min；华中电网考核周期为 15 min。结算周期是指对被考核单位罚款账户进行实际财务结算的时间间隔。国内均按月结算。

2.2.2 国内电网 CPS 考核办法

以华东电网为例，其考核办法^[4]大致可总结为以下几点。

1) 若省（市）电网公司在在一个考核时间段内 $I_{CPS1} \geq 200\%$ 时，则不对其考核结果加收费用。

2) 若省（市）电网公司在在一个考核时间段内 $100\% \leq I_{CPS1} < 200\%$ 时，对于 ACE 在 10 min 内平均值的绝对值超过 L_{10} 的部分，将其乘以 $2 - I_{CPS1}$ 比例系数所得数值折算成 10 min 电量，华东电网有限公司按照相应时段统销电价的 0.5 倍加收费用。

3) 若省（市）电网公司在在一个考核时间段内未能满足 CPS1 考核标准，即 $I_{CPS1} < 100\%$ 时，对于 ACE 在 10 min 内平均值的绝对值未超过 L_{10} 的部分，将其乘以 $1 - I_{CPS1}$ 比例系数所得数值折算成 10 min 电量，华东电网有限公司按照相应时段统销电价的 1 倍加收费用；对于 ACE 在 10 min 内平均值的绝对值超过 L_{10} 的部分，将其乘以 $2 - I_{CPS1}$ 比例系数所得数值折算成 10 min 电量，华东电网有限公司按照相应时段统销电价的 0.5 倍加收费用。

其他电网的考核办法与华东电网大体类似，只是在惩罚力度（系数）、惩罚区间和惩罚结算方式（电价/电量）上有所不同。

2.2.3 考核返还

与北美考核不同的是，国内区域电网不能截留考核产生的惩罚款项或惩罚电量。因此，收缴的罚款还要按一定规则全部返还给被考核单位。国内电网一般按照 CPS1 合格率高低比例（或其他类似的指标高低比例）进行返还。被考核电网最终是受奖还是受罚，由惩罚金额与返还金额之差决定。

3 二者主要差异

3.1 指标差异

北美每个考核点的 CPS1 指标由历时 1 a 的数据计算得到,每次计算所涉及的数据量很大并且有很多重叠部分;国内每个考核点的 CPS1 指标值使用历时 10 min/15 min 数据,每次计算数据量小,且相互之间完全无重叠。北美与国内的 CPS1 指标差别如图 1 所示。为便于比较,这里将北美 CPS1 的考核周期也改为 10 min(北美 CPS1 考核可使用任意周期且不影响指标的理论基础,实际采用周期为 1 个月)。以下将北美的 CPS1 计算方法称为滚动平均法,国内的 CPS1 计算方法称为分段平均法。

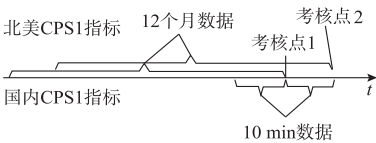


图 1 CPS1 指标计算方法比较

Fig. 1 Comparison of CPS1 criteria calculation methods

CPS1 指标计算方法的改变虽然未涉及 I_{CPS1} 公式的结构,但公式本质已经发生了很大变化。从下文中的对比测算可以明显看出,北美 CPS1 指标变化平稳,而国内 CPS1 指标变化剧烈,即便使用相同的考核周期指标值也完全看不出有任何相似之处。因此,不能简单地认为国内 CPS1 指标与北美 CPS1 指标相似,甚至等同。相应地,建立在 CPS 上的 CPS 考核及其考核效果,也就不能够直接照搬北美的结论,而应独立分析研究。

3.2 考核区别

为便于比较,下文将考核规则细分为惩罚规则、返还规则和考核结算周期 3 个方面。

1) 惩罚规则

在考核周期末,若某区域控制行为违反规定的指标条件,则对该区域实行现金或电量惩罚规则。若进一步细分,惩罚规则又可分为惩罚条件与惩罚量 2 个部分。

北美的惩罚规则是基于 CPS1 和 CPS2 评价指标的 2 个独立惩罚规则,即在考核周期末,若 CPS1 指标或 CPS2 指标不合格,则进行惩罚,且 2 个指标为单独惩罚,其中之一不合格时,只对这一指标进行惩罚处理,与另一指标好坏完全无关。具体情况如表 3 所示。

表 3 北美 CPS 考核标准

Table 3 CPS assessment criteria of North America

规则	惩罚条件	惩罚量(依据越限级别)
CPS1 规则	$I_{CPS1} < 100\%$	协商
CPS2 规则	$I_{CPS2} < 90\%$	协商

国内考核的惩罚规则实际上只存在一个独立的惩罚规则,其由北美 I_{CPS1} 和 I_{CPS2} 中的部分公式、参数组合而成。其惩罚量依据 10 min 或 15 min 的 I_{CPS1} 分为 3 个惩罚区间,每个区间内使用 ACE 累计偏差电量与 L_{10} 的关系计算考核量,如表 4 所示。

表 4 国内 CPS 考核标准

Table 4 CPS assessment criteria of China

惩罚条件	$I_{CPS1} \leq 100\%$	$100\% < I_{CPS1} < 200\%$	$I_{CPS1} \geq 200\%$
惩罚量	L_{10} 内 ACE + L_{10} 外 ACE	L_{10} 外 ACE	无

1) 返还规则

从返还规则来看,北美的惩罚金归考核区域所属的可靠性组织(即标准推行者)所有,不存在返还问题。而在国内基于 CPS 的考核办法中,除了惩罚规则以外,还具有返还规则,即在每个结算周期末,将全部惩罚金或惩罚电量如数返还给所辖电网公司。国内一般依据上一结算周期内的 CPS1 指标合格率来确定所辖各电网公司的返还比例。

2) 考核与结算周期

北美考核与惩罚的结算并不区分,周期均为 1 个月,而国内考核周期很短,一般为 10 min 或 15 min,此时的考核点惩罚量只记录在账面上。惩罚量的实际结算周期为 1 个月。

具体的考核规则比较见表 5。

表 5 考核规则比较

Table 5 Assessment criteria comparison

比较项目	北美考核规则	国内考核规则
惩罚规则	①CPS1 指标级别; ②CPS2 指标级别	结合了北美 I_{CPS1} 和 I_{CPS2} 一些公式、参数的单一惩罚规则
返还规则	无	按上一结算周期内 CPS1 指标合格率/平均值返还
考核周期	1 个月	10 min/15 min
结算周期	1 个月	1 个月

4 分析探讨

4.1 CPS1 指标

在北美 CPS1 计算时使用的是长期(12 个月)滚动平均的计算方法,即每个考核点的 CPS1 指标值计算都是通过对历时 1 a 的数据计算得到。使用长期滚动平均的计算方式,是从系统频率偏差控制目标 ϵ_1 的物理意义经过严格公式推导而来^[3]。

实际上,一个控制区域的控制性能,不仅取决于该区域所辖发电机组一次调频能力、自动发电控制(AGC)机组的数量与性能,更重要的是还依赖于其控制中心的控制与管理水平(决定其发电计划、在线经济调度等的合理程度),故其控制性能的提升,一般来说应是一个长期、缓慢的过程,短期发生较大变

化的可能性很小,因此,只有站在长时间段的角度才可以做出准确的评价。北美 CPS1 在指标构造上使用年滚动平均的方法,其无论在理论推导还是在物理意义上均比较严密。

国内电网在惩罚规则中借用了北美 CPS1 的指标构造形式,但舍弃了长期滚动平均计算方法,而将指标计算直接改为基于短期时段(10 min 或 15 min)平均。这使得国内 CPS1 评价公式中的不等式出现了一边为 ACE 乘以频率偏差除以 $-10B$ 的短期均值,另一边为长期频率偏差控制目标。虽然长期目标也是由一个个短期行为组成,但北美 CPS1 整体是建立在概率体系下的,在概率论中,仅用 10 余个点的样本来评价整体长期状态显然不妥。因此,仅从指标意义上来看,国内 CPS1 指标的构建仍需仔细研究分析。

从另一方面看,由于国内在 CPS 考核规则中使用了依据 CPS 指标合格率排名进行事后惩罚返还等方式,因此,其也具有考核、监督区域长期控制行为的效果。同时,由于国内考核周期非常短,因此,调度员为保证高指标,主观上必然会时刻关注并调整自身 ACE,这在一定程度上有利于提高电网电能质量。此外,电网调度员一般采用轮班制,使用短期考核更容易区分不同调度员的责任,这一点也是应用北美 CPS1 指标不易达到的。

4.2 CPS2 指标

从严格意义上说,国内并没有直接使用北美的 CPS2 进行考核,而只是借用了北美 CPS2 中的限值 L_{10} ,将其与 ACE 在 10 min 内均值之差的大小作为惩罚量的依据,因此两者无法进行直接比较。但从国内的考核规则来看,若正常情况下 $100\% < I_{CPS1} < 200\%$ 时,则区域若想减少被惩罚量,必须控制 ACE,使其在 10 min 内的均值小于 L_{10} ,这相当于北美电网中 CPS2 指标达到 100% 以上。当区域 $I_{CPS1} < 100\%$ 时,则理论上区域必须控制 ACE 在 10 min 内的均值为 0 才能避免被惩罚,这比北美标准更加苛刻。而北美 I_{CPS2} 只需在 90% 以上即为合格,要求宽松得多。因此,国内标准直接使用 L_{10} 作为惩罚依据可能会比北美 CPS2 更为严格。

4.3 考核时段

目前,国内的 CPS 考核相关文献大多都是从短期来阐述 CPS 考核的物理意义^[9-14],即只要 ACE 与频率偏差符号相反,就表明控制行为有利于电力系统频率的恢复。在使用短期的考核时段下,被考核单位为追求减少考核不合格点,主观上会尽量使 ACE 与频率偏差时时反号。相对于 A 标准中 ACE 只需在 10 min 内过零 1 次以上,时刻追求反号显然

更需加大 AGC 机组调节力度。因此会使 AGC 的调节更加频繁,这显然违背了北美 CPS 尽量减少 AGC 调节的初衷。另外,即使被考核单位主观上有实时调节反号的愿望,但由于调节延时的存在,客观上也不可能保证时刻反号,甚至可能加剧反向调节现象,因此,加大 AGC 调节力度也未必一定会带来频率质量上的提升。

北美 CPS 的提出是为了考查区域的长期控制性能以及减少 AGC 无谓调节,因而北美电网使用较长的考核周期,使被考核单位有较大的回旋余地;而国内标准使用 10 min/15 min 的考核周期更加严格但无法达到减少调节的目的。结合国内对 CPS 的修改可以看出,北美与国内的考核所要达到的目标具有本质区别。北美的目标是尽量减少调节,放松对被考核单位的管制,安全性由 CPS 的数学推导和其他标准维持;国内则主要注重于短期安全。

4.4 区域控制性能考核合格线

此处所说的区域控制性能考核合格线,指的是区域不会受到实际经济处罚所需达到的控制性能底线。一套设计完备的控制性能考核,应该有明确的考核合格线,且应具有清晰的物理意义,至少应具有以下作用:被考核单位应该能够清楚地知道如何控制才能够避免考核不合格以避免受罚;当不合格时,被考核单位也应该能够清楚地知道不合格的原因,以利于改进;进一步,区域可以根据考核合格线的要求进行“近线控制”,即在保证考核合格的基础上不必进一步提高控制质量,从而减少过度的竞争性调节;最后,即使所有单位均处于“近线控制”状态,考核指标的设计应保证电网的频率质量仍维持在正常水平之内。

在北美 CPS 考核中,CPS1 与 CPS2 的考核都有明确的考核合格线,即 I_{CPS1} 的合格线为 100%, I_{CPS2} 的合格线为 90%。在每个考核周期末(月末),被考核单位的 I_{CPS1}/I_{CPS2} 只需达到该线上即可不受惩罚。对于被考核单位而言,由于合格线(即控制目标)非常明确,自动控制算法或调度员可以根据自身情况进行针对性的精确控制。当不合格时,被考核单位可以明确不合格原因是由于长期原因(对应 CPS1)或短期原因(对应 CPS2)引起。

在国内考核中,由于使用的是短期分段平均的 CPS1 指标作为考核依据,CPS1 指标波动巨大,因此被考核单位既不可能保证每个考核周期的短期 CPS1 指标全部合格,同时也无法准确地确定每月指标合格率在多少以上可以避免惩罚,使国内考核失去了明确的考核合格线。被考核区域为减少惩罚量,只能无限地加大调节力度,力争减少不合格点

数。虽然表面上看可以促进频率质量提升,但因调节力度增大,调节成本、磨损、环境污染程度等不利因素也会增加。当频率质量达到一定水平,进一步加大调节力度所产生的消耗会超过频率质量提升产生的效益。因此,国内的考核无法实现北美 CPS 维持频率质量、减少调节的设计目标。

由于失去了明确的考核合格线,单从指标值本身无法绝对地衡量区域控制性能的好坏,因此,只能通过指标排名这种相对比较的方式实现,这就可能会出现不合情理的情况,例如:所有区域控制性能都很优秀,而其中某一区域因相对较差而被罚;所有区域控制性能都很差,而其中某一区域因相对较好而受到奖励。

4.5 返还规则

国内电网使用分级调度管理方式,区域电网公司与省级电网公司均为独立企业。从有功功率平衡来看,区域电网公司的主要目的之一就是维护本区域电网的频率质量,在制定控制性能评价标准时首先就是考虑频率目标。在合理的控制性能评价标准形成以后,若省级电网未能达到评价标准所制定的目标,则意味着省级电网的控制性能不足,损害了区域电网公司的利益,区域电网公司理应对省级电网公司进行惩罚,所得款项用以弥补区域电网公司为达到频率质量所做的进一步控制的成本支出或因频率质量下降所造成的经济损失。因此,目前惩罚所得必须全额返还的制度不尽合理,也不利于调频辅助服务的市场化改革。

4.6 标准分析及控制策略

在市场环境下,互联电网控制性能评价标准与考核是区域控制策略制定的主要依据。被考核单位根据标准、考核规则以及自身条件制定合适的发电机组控制策略,一方面保证控制结果符合标准避免惩罚,另一方面尽量减少不必要的调节(即“近线控制”),从而实现自身利益最大化,客观上也减少了自然资源的消耗。

在国内的考核规则下,惩罚量与返还量都直接影响被考核单位的经济利益,这客观上给调度决策人员一个两难的选择,即应该减少被罚量还是提高返还量,这在加大了控制策略决策难度的同时更容易将被考核区域的注意力引入经济方面的权衡,而忽视自身控制性能的提高。优秀的标准与考核规则从外部看应该具有简单、易于分析、可操作性强等特点。与北美相比,目前国内的考核规则相对复杂,这给标准分析及控制策略的制定造成不小的障碍,被考核单位很难针对考核做出精确、科学的控制决策,容易演变成盲目的指标竞赛。

5 CPS1 指标与 CPS1 考核的测算比较

北美标准与国内标准差别很大,因此很多方面无法直观地进行量化比较。例如:国内电网并未真正使用北美 CPS2 指标进行控制性能评价,而只是借用了其中的 L_{10} 作为惩罚大小的依据,因此,CPS2 的异同无法比较,本文测算仅涉及 CPS1 指标部分。另外,北美与国内属于完全不同的考核体系,参数设置与物理意义重叠部分很少,且国内考核参数设置随意性强,因此,本文对于考核部分的测算结果只可作为定性参考。

5.1 数据及计算说明

本次测算使用包含 3 个控制区域实际电网自 2008-09-08 至 2009-03-23 近 7 个月的实际运行数据。其中包括系统频率数据(由 1 s 采样获得);联络线数据(由 5 s 采样获得);实际正在运行的 B 系数;CPS1 中的 ϵ_1 取值为 0.025 Hz; L_{10} 取为 75 MW。

计算国内分段平均的 CPS1,以 10 min 为考核时间段,计算最后 10 d 内所有考核点评价指标。即在每个整 10 min 末,对此 10 min 内的 10 个 CPS1 即时指标求平均。统计结果主要包括与惩罚返还密切相关的合格点数量及合格率指标。

计算北美滚动平均的 CPS1,为便于比较同样以 10 min 为考核时间段,计算最后 10 d 的评价指标。即在每个整 10 min 末,将历时 1 a 内的所有 CPS1 即时值求平均,作为指标值。需要说明的是,由于本测算总数据量不足 1 a,因此无法使用全年的滚动平均计算北美 CPS1。在实验中仅取大约 6 个月的滚动时间长度,尽管如此,结果的差异还是十分明显,足以说明问题。

5.2 CPS1 指标比较

使用国内的分段平均 CPS1,3 个区域指标及排名如表 6 所示。从表中合格点数及合格率来看,区域 C 指标最好,区域 B 其次,区域 A 最差,但从数值上来看相差不多,合格率都达到 50% 以上,且合格率相差仅在 10 个百分点左右。

表 6 3 个区域的指标
Table 6 Indices of three areas

区域	合格点数	合格率/%	指标排名
A	14 513	51.337 1	3
B	17 077	60.406 8	2
C	17 922	63.395 8	1

区域 A 使用短期分段平均所计算出来的 CPS1 指标的具体分布如图 2 所示。区域 B 和 C 使用短期分段平均所计算出来的 CPS1 指标的具体分布见

附录 A 图 A1 和图 A2。

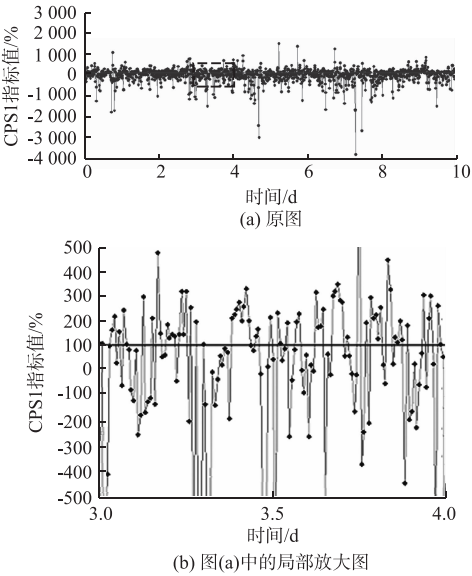


图 2 区域 A 使用短期分段平均计算出的 CPS1 指标分布
Fig. 2 CPS1 index distribution of area A using short period subsection-average method

由图 2 和附录 A 图 A1、图 A2 可以看出,使用短期分段平均所计算出的指标波动幅度巨大,没有明显规律。这样的指标分布更多的只是反映了正常情况下频率偏差在 0 附近的随机波动,而非区域的控制行为。正因为分段平均指标分布过于分散,几乎没有规律可循,电网调度员也就无法根据当前指标大小来准确把握控制力度,只能尽力调节使本区域的 ACE 与频率偏差反号,以争取较高的 CPS 指标合格率。

3 个区域使用北美的滚动平均所计算出的 CPS1 指标计算结果如图 3 所示。

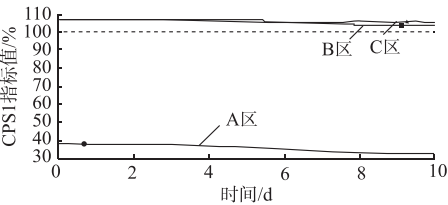


图 3 3 个区域使用长期滚动平均计算出的 CPS1 指标分布
Fig. 3 CPS1 index distribution of three areas using long period rolling average method

从 3 个区域的滚动平均指标可以明显地看出:其控制性能差异很大,区域 B 和 C 的指标值在 100%至 110%之间,属于合格,但从趋势来看,这 2 个区域的指标值正在逐渐下降,未来若不加以改善本区控制性能,则有可能继续下滑到不合格区;而

区域 A 的指标值则一直在 40%以下,而且还在下降,属于严重的不合格。由此可知,该互联电网频率波动主要由区域 A 引起,区域 A 应该大力提高本区域的控制性能。综上所述,使用长期滚动平均所计算出的 CPS1 指标值变化平缓,可以明确衡量各区域长期控制性能的好坏,并可非常直观地反映区域之间控制性能的差异。

5.3 CPS1 考核比较

对于考核的测算比较需要首先说明的是:与考核相关的大部分参数(如惩罚系数、惩罚区间等)的设置由各电网灵活变动,不同的参数设置必然影响最终的考核结果。尤其对于国内的 CPS 考核来说,由于又涉及考核返还等诸多步骤,更增加了考核结果的不确定性,因此,本文对于考核的比较仅用来定性说明及参考,无法涵盖实际电网中所有可能的情况。由于只是测算大致奖惩比例,结果中的各项均无实际单位,因此,电网中的惩罚量按考核规则的不同,可被具体地归算为电价或电量的形式进行奖惩结算。

北美对于 CPS1 指标的考核相当简单直接,惩罚量计算与 CPS1 指标成比例关系。在此算例中,区域 A 的 CPS1 指标在第 10 日末的 CPS1 指标值为 33%,为不合格,则与 100%差额部分(67%)直接乘以一个惩罚系数转换为惩罚金额即可(惩罚系数依据违反标准的等级可设定不同值),本例中取 10 000。区域 B 和 C 的 CPS1 指标值在 100%以上,则不惩罚不奖励。使用北美的滚动平均方法计算出的 3 个区域考核结果为:区域 A 的实际惩罚为 6 700;区域 B 和 C 的实际惩罚为 0。

国内对于 CPS1 指标的考核相对复杂得多,而且各电网在考核细节上也各有不同。表 7 结果为用具有代表性的华东电网考核规则对算例中 3 个区域 10 d 的运行结果进行考核测算。惩罚系数设置如下:ACE 在 L_{10} 内部时为 0.3,在 L_{10} 外部时为 0.5,并且按 CPS1 合格率进行返还。

表 7 国内 3 个区域的考核结果
Table 7 CPS1 assessment of three areas in China

区域	惩罚量	返还量	实际惩罚
A	36 570	30 803	5 767
B	34 533	36 245	-1 712
C	33 984	38 039	-4 055

从最终的实际惩罚来看,区域 A 受罚,区域 B 和 C 受奖。这一结果与实际区域运行情况及北美 CPS1 标准下 3 个区域的 CPS1 指标测算结果大致相同(区域 A 不合格,区域 B 和 C 合格)。这说明国

内的 CPS1 考核在奖罚这个层面也可以实现客观地考核区域控制性能的目的。

但若从考核层面来比较,采用北美滚动平均方法计算时,区域 B 和 C 不惩罚也不奖励;采用国内分段平均方法计算时,区域 B 和 C 被奖励,二者有明显差异。按照北美 CPS,控制区域只要考核合格即可,没有超出合格线后的激励机制。这更符合节能减排的政策要求,因为频率质量到达一定程度后,再进一步提高所消耗资源、环境破坏的代价可能要比频率改善所获得的收益更大,故各控制区域的控制水平只需中规中矩即可。而国内的 CPS 没有合格线,是否被奖励或惩罚取决于其他控制区域的控制水平,尤其在罚劣奖优的规则下,若所有区域都重视指标考核,则容易出现盲目的指标竞赛,相反若所有区域都不重视指标考核,则又可能出现控制水平差的区域反而受奖的不合理现象。

6 结语

通过对控制性能标准及考核的比较,可以得出以下几点。

1) 北美 CPS 具有严格的理论基础,看重区域长期控制表现;考核规则简单,易于理解与操作,但调度责任不易划分。

2) 在国内所作修改中,每考核点只有 10 个/15 个样本数量,对于基于概率统计的 CPS 来说,理论机理值得商榷。

3) 国内考核周期为 10 min/15 min,与二次调节周期相比非常短,就每个考核值来说并不能准确反映周期内的控制性能。

4) 国内使用短考核周期容易造成二次调节的过调、反调及频繁调节。提升频率质量的同时,忽略了二次调节的经济性问题。

5) 国内使用短期考核,容易区分调度责任。

6) 国内标准没有明确的控制性能合格线。

7) 国内电网不能截留区域罚款这一规定,这不符合情理。

8) 国内标准、考核步骤复杂,给控制策略制定等下一步研究工作造成麻烦。

由于互联电网区域控制性能评价及考核涉及系统一次调节、二次调节、管理方法、管理水平以及政策法规等一系列环节之间错综复杂的关系,很多无法量化。因此,互联电网运行控制性能的评价与考核工作应该是一个与时俱进的过程,对于国内区域控制性能评价与考核这一课题,还需要进行深入研究。

学术讨论

感谢《关于 CPS 应用的学术讨论》极富启发性的评述。现就短时段平均指标设计的功能评价及其密切相关的问题,给出不同的看法,并加以讨论。

1) 关于 CPS 是否适合短时段性能评价的问题

首先,本文主旨并非否定国内使用短时段考核目的的合理性,相反本文作者非常认同评阅人关于“北美 CPS 在国内应用时,必须结合国内电网实际加以修改”的基本理念,即国内电网客观环境需要对短期控制行为进行更严格的考核。缺乏针对短期控制行为的考核规则在国内电网运行中可能会引起安全、责任划分等一系列问题,这是由国内电网管理结构、历史问题等多方面与北美情况不同所决定的。但对北美 CPS 所作的修改是否具有理论基础,所得到的国内 CPS 实施后是否能够达到严格考核的预期效果,则是本文所讨论的内容。

由于负荷变化性态在时间上的不规则,设备运行瑕疵出现的不规律,运行人员偶然的调度失误,即运行中主客观因素的不确定性,本文作者认为,对控制区域运行控制性能的评价应该针对一个足够长的时间段进行。这也是为什么北美电网将 A 标准的短期指标改换为 CPS 概率指标的原因之一。

基于概率统计学原理,概率统计需要足够的样本数量才有实际意义。比如统计某地区人群平均身高,则可能需要统计至少数百甚至数千的分布式样本;反过来,测量该地区人群平均身高是否达到全国标准,也需要同样数量级的统计样本。国内 CPS 指标每个考核时段只有 10 个或 15 个点,使用十几个点的均值与全年控制目标相比较来确定这 10 min/15 min 的控制是否合格时,显然结果的偶然性较高。另外,这十几个点的取值是连续的,并非分布式抽样,因此单独考核点的形态也无法说明其整体是否服从某种分布。如:在某个 10 min/15 min 评价时段,正赶上负荷非正常波动,这时即使运行调度人员再努力也无法使得该时段指标合格。因此,若以 10 min/15 min 作为一个考核时段,则在某一较长的时间段内(如 1 a 或 1 个月),应该允许一定数量考核点的评价指标值不合格,但整体合格即可。否则,会由于调节成本过高造成代价过大而不可行。

评阅人所举的身高的例子隐含了控制性能评价在时间上无限可分,即可以做到正确评价任意时间段内的控制水平,通过这些时段评价水平的累加来评价整体水平。本文作者认为,控制性能只在一定长度以上可测,若继续细分,则测得更多的是频率随机波动,而 10 min 或 15 min 的时间尺度是一个有

争议的长度区间。

综上,本文作者认为,北美 CPS 与国内 CPS 的分歧本质上在于对“区域控制性能”一词的理解。

按照作者的理解(可能不准确),国内 CPS 的制定原则是:关注短期控制性能就是要约束和引导控制区域在每个短期时段的控制行为都有利于频率质量的提升。从这一认识出发,将评价指标设计为 10 min/15 min 分段指标并使用 10 min/15 min 进行考核。这就产生 2 个问题:一是,使用 10 min/15 min 时间尺度的理论依据是什么?使用更长的时间尺度(如小时、日)如何?使用更短的时间尺度(如 5 min,1 min 甚至秒级)又如何?二是,修改为短期指标后,按照现有的设备及其自动化水平,是否能够实现预期的考核目标?

在研究过程中,本文作者并未找到国内使用 10 min/15 min 分段平均及短期考核的具体理论依据。显然,分段考核中的分段长度越小,指标中的随机成分就越大,因而不可能无限缩小。那么,分段时间尺度为多长较为合适是一个无法回避的问题。本文作者认为,考虑到一般 AGC 机组响应周期为数分钟,使用十几分钟的时间分段时,指标中的随机成分会过大,故仅从指标上来说无法实现对区域控制性能的正确评价。实际上,国内 CPS 本质上是利用考核过程中的指标合格率和惩罚返还机制来实现衡量区域控制性能而不是直接使用指标本身。惩罚与返还一般是按月结算,由此也可反映出单独使用 10 min/15 min 指标并不能达到应有的评价功能。

综上,本文认为国内 CPS 的理论基础是值得商榷的,标准本身并不能达到正确评价控制区域短期控制性能的目标,若想达到该目标需另辟蹊径,本文作者正在开展这方面的研究工作。

此外,依据 NERC 的“Performance Standards Reference Guidelines”(version 1),评阅人认为“NERC 是承认 CPS1 标准在原理上可用于计算任何(大于 1 min)时段的控制性能的。”对此作者有不同的理解。北美参考指南中的原文如下(为节省篇幅进行了节选):“ $A_{\text{AVGPeriod}} [E_{\text{ACE,avg-1min}} \Delta F_{\text{avg-1min}} / (-10B_{\text{avg-1min}})] \leq \epsilon_1^2$, Period is defined as: ① one year for BA evaluation; ② one month for reporting and Resources Subcommittee review…… I_{CPS1} then converts C_F to a compliance percentage as follows: $I_{\text{CPS1}} = (2 - C_F) \times 100\%$. This calculation is for any time interval. For compliance purposes, CPS1 percentage is calculated over the most recent 12 months (the month of the report plus the most recent 11 consecutive prior months). Epsilon can

change, but since CPS1 is reported monthly, and epsilon would normally not be changed except on a month boundary, it is valid to calculate the monthly and the running 12-month CPS1 compliance as follows: $I_{\text{CPS1month}} = (2 - C_{\text{Fmonth}}) \times 100\%$ ”。

这段文字提出了 2 个时间周期概念,首先是 1 a (12 个月)的 CPS1 计算时段,即公式下标中的 Period,公式中明确将其定义为 1 a,后文中也数次提到 12 个月这一明确数字,可见这并非是一个可任意调整的时间变量。另一周期为报告(report,即考核)周期,也就是“This calculation is for any time interval.”中的“interval”。这个报告周期可以任意取 1 星期,1 h,15 min,10 min 等,北美取为 1 个月(最后公式中下标 month)。但与国内标准不同的是,无论考核(报告)周期设置长或短,每个考核点的 CPS1 指标仍是由该考核点前 12 个月的历史数据利用滚动平均计算而来。因此,本文作者理解,在北美 CPS 评价与考核中可以根据需要自由调整考核周期,而不可以改变指标中滚动平均计算的时间长度。

对于 NERC 的另一篇题为“Balancing and Frequency Control”的文章,本文作者认为文中仅使用短期的例子来说明什么样的控制行为可以产生较好的 CPS 指标,并非认可可以使用短期分段平均可以更好地约束控制行为。

2) 关于 CPS 在国内的应用效果

2000 年后,华东电网频率质量的确有较大的提高,这显然与新 CPS 及其考核的实施有关,但本文作者认为不能将频率质量的改善完全归功于 CPS。因为与 CPS 配套实施的还有一次调频考核标准及发电企业其他方面考核的细化等相关行政措施与手段,这些措施与手段同时实施,作用效果交织在一起,就很难分清仅由 CPS 所带来的频率质量提升的具体比例。其次,国内实施 CPS 带来的频率质量提升的效益与代价之间的关系尚无定论。调研中一些运行人员反馈,在使用 CPS 后,确实有调度员感觉更加紧张,甚至出现机组调节比实行 A 标准时更加频繁的现象。由此可见,国内 CPS 可能存在强调调节从紧而忽视能耗、效率方面的问题。因此认为,过分从紧的调节结果可能会得不偿失,与节能减排的理念相背离。

3) 关于符合 CPS 的控制方法

本文作者同意《关于 CPS 应用的学术讨论》关于无论是北美或国内 CPS“靠人为控制 ACE 与频率偏差时时反号,只能是舍本求末,效果适得其反”的观点。但国内 CPS 考核周期仅为 10 min/

15 min,对于调度员而言,显然主观上希望在这段时间内维持 ACE 与频率偏差的反号,而事实上很多 AGC 策略也是基于追求 ACE 与频率偏差保持反号这一原则来制定的。但主观上有愿望不等于客观上能够实现,由于 AGC 机组的延时性比较大,“尽量控制 ACE 与频率偏差时时反号”显然是不可能完成的任务,因此才会造成大量的过调节、无谓调节,甚至反向调节。

对于《关于 CPS 应用的学术讨论》提到的“CPS1 分值的提高要靠一次、二次调频的基础工作和日常运行中的发用电平衡工作相结合才能实现”的观点,本文作者有同样的认识,即频率控制性能的改善需要运行计划(机组组合计划、发电计划、联络线交换计划等)与运行调度(在线经济调度、AGC、频率一次调节等),甚至是运行规划(电源和网络规划)等各个环节的相互配合才能达到,这些环节缺一不可。但目前国内的 CPS 给调度员造成紧张的心理暗示,容易引导控制策略的设计人员和电网调度人员从短期着手来追求控制 ACE 与频率偏差尽量反号。

4) 国内电网与北美电网的不同及进一步工作

目前,北美电网基本为交流互联电网,大多采用频率偏差控制(TBC)模式,因此,其评价标准也较为统一,均使用 CPS。国内电网与北美电网存在诸多不同,主要表现在以下几点:①在连接区域电网的特高压线路投运初期,出于安全考虑,要求其输送功率波动不能过大。②特高压输电线路的投运,东北电网和西北电网分别与主网通过背靠背直流连接,长距离大容量交流和直流线路的相继投运,大火电和大风电的相继接入等,使得国内电网区域间的联系愈加紧密、连接方式亦多元而复杂。③北美电网采取统一的平面管理结构,各个子电网调度级别和权限相同;而国内采用国家、区域和省级电网的三级输电网调度管理结构,国调、网调和省调的管辖范围不同、调度职责各异,三级调度机构拥有电源数量和结构也差异较大、迥然不同,例如某些网调拥有该区域电网辖区内绝大部分水电优质调频资源的调度权,而某些网调由于所有机组的调度权都归属省调,没有 AGC 机组可以调度。④随着千万千瓦级风电基地的规划和建设,国内风电几乎以每年翻一番的速度在增长。由于风资源地理分布不均衡,使各电网内部含有风电的比例也各不相同,个别省级电网的风电容量占比接近 20%。

在上述情况下,若使用统一的有功功率平衡控制性能评价标准和考核办法,则会引发诸多问题。因此,国内调度部门根据电网实际情况分别实施了

A 标准、CPS 和 T 标准,但这些远远不能适应国内电网的复杂情况,需要开展相关问题的研究工作。

本文作者赞同《关于 CPS 应用的学术讨论》关于“应用 CPS 开展长时段的性能评价的经济效益很大一部分是在容忍偏离计划潮流”的认识。区域间通过无意交换电量这一方式互为调节后备,正是大互联电网在有功功率平衡方面的优势之一。特高压交流电网运行初期,其潮流不能偏移过大,目前通过 T 标准^[15]来评价与考核。但 T 标准与 CPS 间存在兼容性问题,有待于进一步解决。

厂网分开后,在风电容量高占比电网中,不能不考虑由于风电出力的随机性与不确定性对电网频率控制所造成的不良影响,而电源短缺电网的频率调节控制性能评价确是新问题,很有必要及时开展相关评价标准的修订工作。

对于直流背靠背与“三华”电网连接的东北和西北电网,由于其频率可靠性较“三华”电网低,因此,如何设计适宜的 CPS, CPS 与扰动控制标准(DCS)如何设计可以使得两者可有效衔接,也是应该做的工作。

此外,同步相量测量装置(PMU)逐渐普及,基于该装置的广域测量系统(WAMS)所得到数据采样时间可达 20 ms,这为动态自然频率特性系数的应用奠定了基础。进一步可基于此开展频率一次、二次调节性能的单独评价,文献[16]对该问题作了初步的探索性思考。

本文作者希望在理论层面上客观地比较北美与国内 CPS 及其考核的区别,而分析表明,国内 CPS 的理论基础是值得商榷的,通过该标准并不能达到正确评价控制区域短期控制性能的目标。北美 CPS 及其考核也并非完全合理,亦不能将其原样照搬到国内电网。因此,只有在对 2 个标准充分比较分析、搞清其理论内涵和评价机理的基础上,才能相互取长补短,从而针对国内电网实际情况,构建出更加适合国内电网的频率调节与控制性能评价标准。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] NERC. Complete set of reliability standards[EB/OL]. [2009-09-14]. http://www.nerc.com/files/Reliability_Standards_Complete_Set_2009Sept14.pdf.
- [2] 刘尧,林伟,李卫东,等. 互联电力系统运行控制性能评价标准的探讨[J]. 电力系统自动化,2005,29(8):87-91.
LIU Rao, LIN Wei, LI Weidong, et al. Discussion on the control performance assessment criteria for interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 87-91.

- [3] JALEELI N, VANSLYCK L S. NERC's new control performance standards[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1092-1099.
- [4] 汪德星, 张启平, 杨立兵. 基于 AGC 技术的电力系统频率控制标准研究及在华东电力系统中的应用[C]//中国科协 2004 年学术年会电力分会场暨中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集, 北京: 526-530.
- [5] 汪德星. 华东电网实行 CPS 标准的探索[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 41-44.
WANG Dexing. Study of CPS standards in East China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 41-44.
- [6] 徐兴伟, 林伟, 王家宏. 东北电网 A 标准 AGC 模式应用于 CPS 标准分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 72-74.
XU Xingwei, LIN Wei, WANG Jiahong. Analysis of CPS performance of applying the AGC control model based on a standard in Northeast power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 72-74.
- [7] 赵良, 王涛, 张锋. 浙江电网联络线功率交换考核指标(CPS)优化研究[J]. 浙江电力, 2004(6): 23-26.
ZHAO Liang, WANG Tao, ZHANG Feng. Research on optimizing the power exchange index (CPS) of connecting line in Zhejiang grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2004(6): 23-26.
- [8] 周毅. 华东电网 CPS 考核标准运行分析[J]. 华东电力, 2006, 34(5): 41-43.
ZHOU Yi. Implementation of CPS assessment standard for East China power grid[J]. East China Electric Power, 2006, 34(5): 41-43.
- [9] 钱玉妹, 崔恒志, 高宗和. 适应 CPS 标准的 AGC 系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 69-71.
QIAN Yumei, CUI Hengzhi, GAO Zonghe. Design and application of automatic generation control system adapting to CPS standard [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11): 69-71.
- [10] 唐跃中, 张王俊, 张健, 等. 基于 CPS 的 AGC 控制策略研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 75-79.
TANG Yuezong, ZHANG Wangjun, ZHANG Jian, et al. Research on control performance standard based control strategy for AGC [J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 75-79.
- [11] 高宗和, 滕贤亮, 涂力群. 互联网 AGC 分层控制与 CPS 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 78-81.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, TU Liqun. Hierarchical AGC mode and CPS control strategy for interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 78-81.
- [12] 高宗和, 滕贤亮, 张小白. 互联网 CPS 标准下的自动发电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 40-44.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai. Automatic generation control strategy under control performance standard for interconnected power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 40-44.
- [13] 贾燕冰, 高翔, 高伏英, 等. 华东电网 CPS 标准控制策略现状分析及展望[J]. 华东电力, 2007, 35(9): 16-21.
JIA Yanbing, GAO Xiang, GAO Fuying, et al. Status quo and prospects of control strategies of East China power grid under control performance standard [J]. East China Electric Power, 2007, 35(9): 16-21.
- [14] 李滨, 韦化, 农蔚涛, 等. 互联网 CPS 下 AGC 控制参数的优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 37-41.
LI Bin, WEI Hua, NONG Weitao, et al. Optimization of AGC control parameters under the control performance standard for interconnected power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 37-41.
- [15] 高宗和, 陈刚, 滕贤亮, 等. 特高压互联网联络线功率控制: (二) AGC 性能评价[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 61-64.
GAO Zonghe, CHEN Gang, TENG Xianliang, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid: Part two AGC performance assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 61-64.
- [16] 李卫东, 刘晓, 巴宇. 新一代互联网运行控制性能评价标准设计的理论基础与工作展望[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(1): 13-19.
LI Weidong, LIU Rao, BA Yu. Theory and prospect of performance evaluation criteria design for new interconnected power grid operation and control [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(1): 13-19.

巴宇(1981—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 互联网运行控制性能评价. E-mail: bayu@mail.dlut.edu.cn

刘 晓(1967—), 女, 副教授, 主要研究方向: 电力系统分析。

李卫东(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统分析。

Comparison of CPS and Its Assessment Between North America and China

BA Yu, LIU Rao, LI Weidong

(College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The control performance standard (CPS) is currently widely used as an area control performance assessment criterion in electric power grids of China. It is noted that, when it was introduced, the assessment criterion rules and some parameters have been altered, including mainly short period averaging of CPS1 and relinquishment of direct use of CPS2 and penalty return, etc. Proceeding from theoretical basis and quantitative calculation, the difference between North America and China in using the CPS is analyzed and compared as has the possible impact on the final assessment. Some relevant concepts involved in the control performance assessment are clarified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50577002).

Key words: interconnected power grid; control performance standard (CPS); control performance evaluation; control performance assessment; automatic generation control (AGC)

附录 A

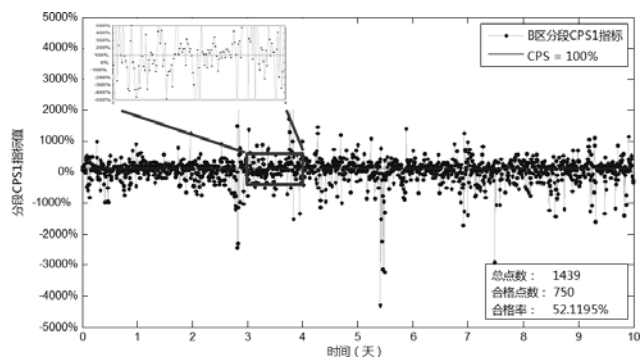


图 A1 区域 B 使用短期分段平均计算出的 CPS1 指标分布

Fig.A1 CPS1 index distribution of area B using short period subsection-average method

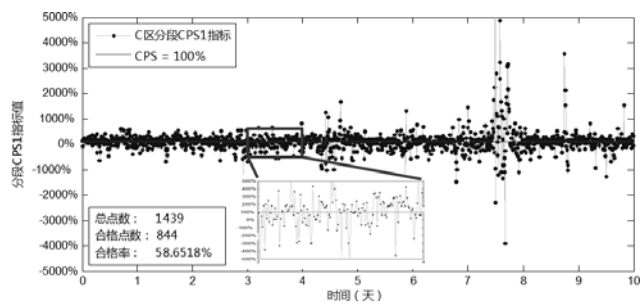


图 A2 区域 C 使用短期分段平均计算出的 CPS1 指标分布

Fig.A2 CPS1 index distribution of area C using short period subsection-average method