电网 AGC 与 AVC 协调控制方法

于 汀[1,2]，蒲天骄[2]，刘广一[2]，李时光[2]，赵 聪[3]，田爱忠[4]

(1.四川大学电气信息学院，四川 成都 610065；2.中国电力科学研究院，北京 100192；3.智能电网教育部重点实验室(天津大学)，天津 300072；4.新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)，北京 102206)

摘要：电力系统有功功率与无功功率耦合日益紧密，自动发电控制(AGC)与自动电压控制(AVC)相互解耦的模式会影响电网的运行控制效果。基于 AGC 与 AVC 不同的控制周期，在时间尺度上建立了分钟层和秒层两级衔接的 AGC 与 AVC 协调控制模式，提出了控制方法。在分钟层级上，建立有功功率与无功功率联合的最优潮流模型，提出 AGC 与 AVC 的联合优化控制方法；在秒层级上，完善 AGC 与 AVC 各自的控制策略，提出 AGC 与 AVC 的协调校正控制方法。通过算例验证表明，所提方法在满足 AGC 与 AVC 各自控制目标的同时，实现了电网的经济运行，抑制了 AGC 与 AVC 的相互影响，促进了 AGC 与 AVC 的相互支撑。

关键词：有功功率；无功功率；自动发电控制；自动电压控制；联合优化；协调校正

Coordinated control method of AGC and AVC in power grid

YU Ting[1,2], PU Tianjiao[2], LIU Guangyi[2], LI Shiguang[2], ZHAO Cong[3], TIAN Aizhong[4]

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Key Laboratory of Smart Grid, Tianjin University, Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 4. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the coupling relationship between active power and reactive power in power system becoming stronger, the control mode that automatic generation control (AGC) and automatic voltage control (AVC) operate separately may influence the control effect. Considering of the different control periods of AGC and AVC, this paper proposes a coordinated control method of AGC and AVC with a connection on the time scale of minute level and second level. On the minute level, an optimal power flow model of active power and reactive power associated together is established, a AGC and AVC associated optimization control method is proposed. On the second level, the respective control strategy of AGC and AVC is improved and a coordinated correction control method of AGC and AVC is proposed. Simulation is made to verify that the method proposed meets the respective control objective of AGC and AVC. At the same time, it can realize the economic operation of power system, restrain the mutual influence of AGC and AVC, and promote the mutual support between AGC and AVC.

Key words: active power; reactive power; automatic generation control (AGC); automatic voltage control (AVC); associated optimization; coordinated correction

中图分类号： TM77 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)15-0042-06

0 引言

自动发电控制(Automatic Generation Control，AGC)和自动电压控制(Automatic Voltage Control，AVC)是电网调度自动化系统的两大核心应用。其中 AGC 负责有功功率控制，主要功能是通过调节发电机组有功出力使系统频率和联络线功率跟踪计划值，并维持电网重要断面或线路的潮流水平在安全范围内。AVC 负责无功功率控制，主要功能是通过调节无功设备的无功补偿水平维持电网电压合格并降低网损。经过多年发展，电网 AGC 和 AVC 技术现已相对成熟，并陆续在各级调度中心实现闭环控制[1-7]。

目前电网 AGC 与 AVC 之间是相互解耦的，各自独立实施控制。这种有功与无功解耦的控制模式

在电网建设初期较为有效。但随着电网联系日益紧密、负荷水平不断增长，AGC 与 AVC 各自独立的控制模式暴露出了一定的问题。例如：随着电网间联系程度增强，电网间联络线传输功率水平提高，当联络线功率与计划值偏差较大时，AGC 为跟踪计划值实施控制会引起联络线功率大幅波动，这会导致联络线端节点及其近区电网的电压波动，从而影响 AVC 的控制质量。另一方面，随着负荷水平增长，电网内部分线路潮流水平较高，AVC 对其端节点电压的调节可能会引起线路功率的改变甚至越限，从而影响 AGC 的控制效果。可见，电网有功功率控制与无功功率控制不可完全解耦，相互独立实施控制可能会引起 AGC 与 AVC 反复调节，影响彼此的控制效果。

近些年已有学者对电网 AGC 与 AVC 协调控制进行了积极探索。文献[8-9]以提高电压稳定性和抑制低频振荡为目标，研究负荷增长及故障后的 AGC 与 AVC 协调策略，但没有考虑电网正常情况下的控制策略；文献[10-11]研究 AGC 与 AVC 分层协调控制策略，提出了优化层和预测层的控制算法并验证了协调效果，但对实时控制层面考虑不足；文献[12-13]基于事件驱动机制提出 AGC 与 AVC 交替迭代的协调控制策略，减少了两者间的相互影响，但未涉及 AGC 与 AVC 相互的辅助支撑调节。

本文考虑电网 AGC 与 AVC 不同的控制周期，按照时间尺度提出了分钟层和秒层两级衔接的 AGC 与 AVC 协调控制方法。在分钟层级实现有功功率与无功功率的联合优化控制，在秒层级进行有功功率与无功功率的协调校正控制。两个层级相互配合，提高电力系统安全经济运行水平。

1　协调控制体系架构

根据国家电网公司《智能电网调度技术支持系统》系列标准中的规定，电网 AGC 控制周期不超过 20 s，电网 AVC 控制周期不超过 5 min。可见，虽然 AGC 与 AVC 均属实时控制范畴，但控制周期却不在同一时间尺度上。所以，实施 AGC 与 AVC 协调控制需在分钟层级和秒层级分别进行协调，并保持两个层级之间的相互衔接。为此，本文在充分利用电网 AGC 和 AVC 现有实现方式的基础上，对各自的模型和策略进行完善，并按时间尺度提出了分钟层和秒层两级控制体系架构。如图 1 所示。

该协调控制体系架构总体思路是在分钟层级上进行有功与无功统一建模，周期地进行有功无功联合优化计算，统一给出 AGC 和 AVC 的控制命令。

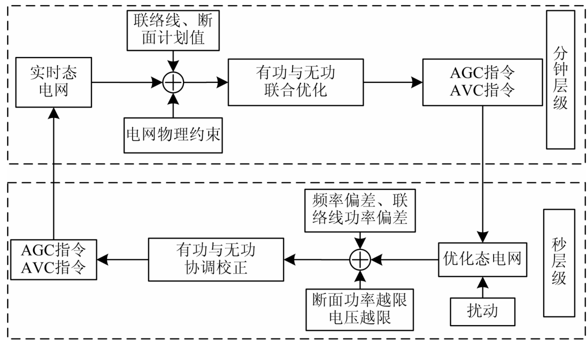

图 1　协调控制体系架构

Fig. 1 Structure of coordinated control

而在秒层级上完善 AGC 与 AVC 各自的控制策略，建立二者间的协调机制，并周期地监视优化后电网运行状态，当发现有状态量超出允许运行范围时进行有功与无功的协调校正计算，分别给出 AGC 和 AVC 的控制命令。两个层级的具体实现方式如下。

分钟层级：采用电网 AVC 的控制周期，每 5 min 进行一次优化计算，并在 AVC 无功优化基础上对数学模型进行完善，形成有功无功联合的控制模式。将 AGC 机组有功作为可控变量纳入到无功优化数学模型中，进行全网有功无功联合优化计算，统一生成 AGC 和 AVC 控制指令，使电网运行于最优潮流状态。在保证 AVC 降低网损、提高电压合格率的同时，也满足 AGC 有功与负荷实时平衡、联络线功率跟踪计划值、线路潮流合格等要求。

秒层级：采用 AGC 的控制周期，每 10~20 s 进行一次校正计算。在电网运行于优化态后，AGC 与 AVC 各自周期地监视由于扰动(如负荷变化等)引起电网状态量的改变。其中 AGC 主要监视电网频率、联络线功率、线路潮流，AVC 主要监视节点电压水平。若状态量超出允许运行范围时，则进行 AGC 与 AVC 的协调校正控制，在实现将状态量控制在合理运行范围内的同时，避免引起新的状态量越限。本层级的 AGC 与 AVC 协调校正机制是在对两者各自校正控制策略进行完善的基础上建立的，目的是既抑制相互间控制策略的不协调对控制效果的影响，又能够在必要时实现两者间相互的辅助支撑调节。

2　分钟层级优化模型

分钟层级主要任务是在相对较长的时间尺度内调整有功和无功电源出力跟踪负荷趋势性变化，使电网运行于最优潮流状态附近。其数学模型可通过在 AVC 无功优化模型基础上引入 AGC 的控制目标和约束，建立有功与无功联合的最优潮流模型来

实现。

通常 AVC 的数学模型是以网损最小为目标、安全性为约束的非线性优化问题[14]，如式(1)所示。

$$\min P_{\mathrm{loss}}=\sum_{i=1}^{N}V_i\sum_{j=1}^{N}V_jG_{ij}\cos\theta_{ij}$$
$$\mathrm{st}\begin{cases}P_{\mathrm{G},i}-P_{\mathrm{D},i}-V_i\sum V_j\left(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij}\right)=0 & i\in N\\ Q_{\mathrm{G},i}-Q_{\mathrm{D},i}-V_i\sum V_j\left(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij}\right)=0 & i\in N\\ V_{i,\min}\le V_i\le V_{i,\max} & i\in N\\ Q_{\mathrm{G}i,\min}\le Q_{\mathrm{G},i}\le Q_{\mathrm{G}i,\max} & i\in S_{\mathrm{G}}\\ T_{i,\min}\le T_i\le T_{i,\max} & i\in S_{\mathrm{T}}\\ B_{i,\min}\le B_i\le B_{i,\max} & i\in S_{\mathrm{B}}\end{cases} \tag{1}$$

式中：N 为总节点数；S_{G} 为发电机节点集合；S_{T} 为有载调压变压器节点集合；S_{B} 为无功补偿节点集合；P_{loss} 为网损；V、θ 为节点电压幅值和相角；G_{ij}、B_{ij} 为节点导纳矩阵元素的实部和虚部；P_{G}、Q_{G} 为发电机有功和无功；P_{D}、Q_{D} 为负荷有功和无功；T 为有载调压变压器档位；B 为无功补偿量；下标 max、min 表示限值的上限和下限。

AGC 主要目标是控制频率在额定值附近、控制联络线功率跟踪计划值、控制重要线路潮流安全。对于频率控制，式(1)约束条件中的等式约束是保证各节点发电和负荷平衡，从而实现全系统供需平衡，及维持频率在额定值附近。但由于求解过程中各节点会存在一定的发电和负荷不平衡量，其在全系统累加后可能增大频率与额定值偏差，为保证频率控制质量还需引入频率波动约束，如式(2)所示。

$$\left|\sum_{i\in S_{\mathrm{G}}}P_{\mathrm{G},i}-\sum_{j\in S_{\mathrm{D}}}P_{\mathrm{D},j}\right|\le 10B\varepsilon \tag{2}$$

式中：B 为系统频率偏差系数(MW/0.1 Hz)；ε 为频率允许的波动量，通常不超过 0.5 Hz；S_{D} 为负荷节点集合。

对于联络线功率控制，建模时可将联络线等值为发电机组，联络线功率即为发电机组功率，送端电网等值发电机组功率为负，受端电网为正。该等值机组无功功率固定，有功功率跟踪计划值。设 L 为联络线端节点，则等值机组约束条件为

$$\left|P_{\mathrm{G},L}-P_{\mathrm{T},0}\right|\le\eta \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{T},0}$ 为联络线计划功率；η 为联络线功率偏差死区，通常不超过 5 MW。

对于重要断面的控制通常是指线路潮流控制，基本的要求是避免过载。为不失一般性，可约束系统内各线路功率，如式(4)所示。

$$P_{ij,\min}\le P_{ij}\le P_{ij,\max} \tag{4}$$

式中，P_{ij} 为线路 i，j 的功率。

将 AGC 机组有功功率的可调范围与式(2)~式(4)共同补充到式(1)的约束条件中，形成的以网损最小为目标的最优潮流模型为

$$\min P_{\mathrm{loss}}=\sum_{i=1}^{N}V_i\sum_{j=1}^{N}V_jG_{ij}\cos\theta_{ij}$$
$$\mathrm{st}\begin{cases}P_{\mathrm{G},i}-P_{\mathrm{D},i}-V_i\sum V_j\left(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij}\right)=0 & i\in N\\ Q_{\mathrm{G},i}-Q_{\mathrm{D},i}-V_i\sum V_j\left(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij}\right)=0 & i\in N\\ V_{i,\min}\le V_i\le V_{i,\max} & i\in N\\ Q_{\mathrm{G}i,\min}\le Q_{\mathrm{G},i}\le Q_{\mathrm{G}i,\max} & i\in S_{\mathrm{G}}\\ T_{i,\min}\le T_i\le T_{i,\max} & i\in S_{\mathrm{T}}\\ B_{i,\min}\le B_i\le B_{i,\max} & i\in S_{\mathrm{B}}\\ P_{\mathrm{G}i,\min}\le P_{\mathrm{G},i}\le P_{\mathrm{G}i,\max} & i\in S_{\mathrm{G}}\\ \left|\sum_{i\in S_{\mathrm{G}}}P_{\mathrm{G},i}-\sum_{j\in S_{\mathrm{D}}}P_{\mathrm{D},j}\right|\le 10B\varepsilon & \\ \left|P_{\mathrm{G},i}-P_{\mathrm{T},0}\right|\le\eta & i=L\\ P_{ij,\min}\le P_{ij}\le P_{ij,\max} & i,j\in N\end{cases} \tag{5}$$

应用原对偶内点法可对上式进行可靠求解，统一计算出分钟层级的 AGC 和 AVC 控制策略。

3 秒层级校正策略

秒层级主要任务是在分钟层级优化控制结束后，到下一次分钟层级优化控制开始前，在相对较短的时间尺度内周期地监视电网状态量变化，若状态量超出了运行允许范围，则进行 AGC 与 AVC 的协调校正控制，将状态量维持在合理运行区间。

在秒层级上，状态量的改变主要由扰动(如负荷波动)引起，它对 AGC 的影响要明显高于 AVC。所以本文的协调校正策略总体思想是以 AGC 为主、AVC 配合调节。即 AVC 通过灵敏度关系定量计算 AGC 调节对其的影响，若影响在允许范围内，则 AVC 只监视不调节；若影响超出了允许范围，则 AVC 配合 AGC 同步调节来消除影响。同时在线路功率控制等方面，必要时可由 AVC 替代 AGC 进行辅助调节。而在 AVC 单独调节时，需不引起 AGC 控制量越限。

3.1 AGC 与 AVC 的交互影响量

AGC 通常采用定联络线和频率偏差控制(TBC)方式。通过计算区域控制偏差(ACE)来判断 AGC 是否动作。ACE 的计算公式为

$$ACE=10B\Delta f+\Delta P_{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中，Δf 和 ΔP_{T} 为频率偏差和联络线功率偏差。

从式(6)可见，ACE 是由负荷变化和联络线功率变化共同影响的。若 ACE 主要由负荷波动导致的频

率变化所引起，则其可在全网范围内由 AGC 机组按一定比例分摊消纳，各 AGC 机组调节幅度有限，在全网范围内引起的潮流变化不大，对电网电压的影响较小。若 ACE 主要由联络线功率偏差引起，当偏差较大时，各 AGC 机组为消除联络线功率偏差而动作时，会对联络线端节点电压产生一定幅度的波动，存在电压越限的风险。

另外，根据线路潮流的表达式：

$$P_{ij}=V_iV_j(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij})-V_i^2G_{ij} \tag{7}$$

可知，线路端电压是线路功率的函数，所以 AVC 对重载线路和联络线端节点电压的调节也会影响线路和联络线的功率水平，进而影响 AGC 的控制效果。

可见在秒层级控制方面，AGC 与 AVC 之间的交互影响主要存在于联络线或线路的功率与其端节点电压之间。所以 AGC 与 AVC 的协调校正控制策略就是通过完善 AGC 与 AVC 现有的控制策略来避免这种交互影响，并在必要时利用这种交互影响实现两者间相互的辅助支撑调节。

3.2 联络线协调校正控制

为保证联络线功率的控制效果，在分配 AGC 机组调节功率时，需考虑联络线功率对机组有功的灵敏度。计算方法如下：

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{\rm G}}=\frac{\partial P_{ij}}{\partial\theta_i}\cdot\frac{\partial\theta_i}{\partial P_{\rm G}}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial\theta_j}\cdot\frac{\partial\theta_j}{\partial P_{\rm G}}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i}\cdot\frac{\partial V_i}{\partial P_{\rm G}}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j}\cdot\frac{\partial V_j}{\partial P_{\rm G}} \tag{8}$$

由于联络线其中一端在对端电网，在只进行本端电网灵敏度计算时可将其视为常量。设节点 i 在对端电网、节点 j 在对端电网，式(8)可简化为

$$\frac{\partial P_{\rm T}}{\partial P_{\rm G}}=\frac{\partial P_{\rm T}}{\partial\theta_i}\cdot\frac{\partial\theta_i}{\partial P_{\rm G}}+\frac{\partial P_{\rm T}}{\partial V_i}\cdot\frac{\partial V_i}{\partial P_{\rm G}} \tag{9}$$

当 ACE 主要由联络线功率偏差引起，可选择灵敏度大的机组主要负责联络线功率调节，这些机组可按调节速率或备用容量等方式承担调节功率，以保证可靠消除联络线功率偏差。而当 ACE 主要由频率偏差引起，主要选择灵敏度因子小的机组进行调节，以保证消除频率偏差的同时减轻对联络线功率的影响。

为配合 AGC 对联络线功率的控制，避免由于联络线功率波动导致节点电压越限，AVC 需与 AGC 同步监视联络线功率水平，根据联络线功率对节点电压的灵敏度计算 AGC 调节对节点电压的改变量。灵敏度计算方法如下：

$$\frac{\partial P_{\rm T}}{\partial V_i}=V_j(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij})-2V_iG_{ij} \tag{10}$$

AVC 根据式(10)的灵敏度以及待校正联络线功率偏差量定量计算 AGC 调节后节点电压水平，若该电压正常，则无需进行 AVC 控制；若该电压越限，则实施 AVC 控制配合 AGC 调节，根据电压无功灵敏度校正算法[15]计算 AVC 控制指令，并与 AGC 指令一并下发，在校正联络线功率的同时避免引起节点电压越限。

3.3 重载线路协调校正控制

AGC 对电网内重载线路功率的控制，需要根据式(8)的计算方法找出灵敏度较大的机组负责调节线路功率，并在需要校正重载线路功率时，结合 ACE 所需的调节方向优先选择既能有效降低线路功率，又能减小电网 ACE 的机组进行调节。

但在某些情况下，如 ACE 处于调节死区时，AGC 校正重载线路功率会恶化电网 ACE。考虑到线路端电压是线路功率的函数，所以此时可用通过 AVC 改变线路端节点电压的方式来替代 AGC 实现线路功率校正。

AVC 调节与线路端节点电压无功灵敏度高的无功源，改变端节点电压从而实现校正线路功率的目的。这在本质上是通过调节无功改变线路有功，需利用线路有功对无功源(如机组)无功的灵敏度，其表达式为

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_{\rm G}}=\frac{\partial P_{ij}}{\partial\theta_i}\cdot\frac{\partial\theta_i}{\partial Q_{\rm G}}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial\theta_j}\cdot\frac{\partial\theta_j}{\partial Q_{\rm G}}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i}\cdot\frac{\partial V_i}{\partial Q_{\rm G}}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j}\cdot\frac{\partial V_j}{\partial Q_{\rm G}} \tag{11}$$

根据式(11)找出对线路功率灵敏度高的无功源，并根据灵敏度和待校正线路功率偏差量计算需调节的总无功量。然后根据电压无功灵敏度校正算法[15]计算 AVC 控制指令，从而将线路功率控制在限值范围内。需要指出的是，无功调节对线路功率的改变量通常不大，所以此方法只适用于微调，做为一种在特殊情况下 AVC 辅助 AGC 调节的方法。

3.4 节点电压协调校正控制

AVC 对联络线或重载线路近区电网节点电压的校正可能会引起联络线或重载线路功率的改变。考虑到电网正常运行时，即使节点电压发生越限，一般也是小幅偏离电压限值。所以正常情况下 AVC 调节对联络线或线路功率的改变量不会很大。但为了保证 AVC 单独进行校正控制时不使联络线或线路功率恶化，可以利用其功率可调裕度来约束电压的调节范围，具体表达式为

$$\Delta V\le\left|\Delta P_{ij}\cdot\frac{\partial Q}{\partial P_{ij}}\cdot\frac{\partial V}{\partial Q}\right| \tag{12}$$

式中：ΔV 是可调节的电压幅度；ΔP_{ij} 是可调节的

功率裕度。

4 算例验证

为验证本文所提 AGC 与 AVC 协调控制效果，选取新英格兰 10 机 39 节点系统[16]，并将节点 20 的负荷等效为送端电网联络线功率，设节点 21、22 之间所连线路为重载线路。首先验证分钟层级控制策略，将奇数负荷节点的负荷增加 10%，偶数负荷节点的负荷减少 10%，则系统总负荷增加 123.2 MW，频率下降 0.55 Hz，10 节点电压越上限(电压限值 0.94~1.06 pu)。设此时段联络线功率计划值为 800 MW，重载线路功率限额为 583 MW。通过 AGC 与 AVC 联合优化后，控制效果如表 1 所示。

表 1 分钟层级优化控制效果

Table 1 Optimization control effect of minute level

控制变量	优化前	优化后
10 节点电压/p.u.	1.062	1.057
线路 22-21 功率/MW	599.78	573.39
联络线功率/MW	680.0	796.8
电网频率/Hz	49.45	49.99
网损/MW	31.72	32.63
网损率/%	0.51%	0.50%

可见，通过 AGC 与 AVC 的协调优化控制，系统频率、联络线和重载线路功率、节点电压均维持在合格范围内。系统网损有所增加，这主要是由于优化后发电功率大幅增加所致，但在网损最小为目标的优化过程中，网损率仍维持在较低水平。

基于分钟层级优化后电网断面验证秒层级 AGC 与 AVC 协调校正控制策略。对于联络线功率控制，设某时刻联络线功率计划值变为 787 MW，根据联络线功率对机组功率的灵敏度关系，选择 33、34 两台机组进行调节，并按备用容量分配 10 MW 左右的调节功率。但单独进行 AGC 调节后会导致节点 20 电压越下限，由 0.943 变为 0.939。所以需要 AVC 配合 AGC 同步调节，根据电压无功的灵敏度关系，仍然选择机组 33、34 进行 AVC 调节，在不引起其他节点电压越限的同时，两台机组共同承担至少 9 Mvar 的无功功率。通过 AGC 与 AVC 协调校正的控制效果如表 2 所示。

表 2 秒层级联络线协调校正效果

Table 2 Coordinated correction effect of tie-line at second level

控制变量	优化前	优化后
联络线功率/MW	796.8	786.9
节点 20 电压/p.u.	0.943	0.944

可见通过 AGC 与 AVC 的协调校正，在将联络线功率控制在合理范围内的同时，也避免了联络线端节点电压越限。

对于重载线路控制，若 ACE 合格而线路 22-21 功率限值由 583 MW 降为 573 MW，则线路功率轻微越限。利用 AVC 辅助 AGC 调节，根据线路功率对机组无功的灵敏度选择机组 35、36 参与 AVC 调节，在保证其他节点电压合格的同时两台机组共同承担至少 36 Mvar 无功功率，调节效果如表 3 所示。

表 3 秒层级重载线路协调校正效果

Table 3 Coordinated correction effect of heavy load line at second level

控制变量	优化前	优化后
ACE/MW	5.46	5.46
线路 22-21 功率/MW	573.39	572.87
21 节点电压/p.u.	1.039	1.034
22 节点电压/p.u.	1.057	1.052

可见当线路功率轻微越限时，利用 AVC 调节线路两端电压替代 AGC 校正重载线路功率，可在不影响电网 ACE 的同时，将线路功率控制在合理范围内，还可改善节点电压水平。

对于节点电压控制，当调节重载线路端节点电压时，由于线路 22-21 功率 572.87 MW 靠近额定限值 573 MW 运行，所以 AVC 对节点 21、22 的电压调节可能引起线路功率越限，需根据式(12)限定节点电压调节范围，如表 4 所示。

表 4 重载线路节点电压调节范围

Table 4 Node voltage regulation range of heavy load line

节点号	当前电压/p.u.	电压下限/p.u.	电压上限/p.u
21	1.034	0.94	1.035
22	1.052	0.94	1.053

可见由于线路功率接近上限，为不使其越限，AVC 对线路端节点电压的上调空间受到限制。

5 结论

本文提出的电网 AGC 与 AVC 协调控制方法，充分基于现有 AGC 与 AVC 的实现方式，并通过对数学模型和控制策略的完善，实现了不同时间尺度上 AGC 与 AVC 的联合优化和协调校正。通过算例分析验证了该方法是正确有效的，同时控制效果也表明了该方法在满足 AGC 与 AVC 各自控制目标的同时优化了电网的经济运行水平，抑制了 AGC 与 AVC 间的交互影响，促进了 AGC 与 AVC 间的辅助支撑调节。

参考文献

[1] 温步瀛. 计及调速器死区影响的两区域互联电力系统 AGC 研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 176-182.

WEN Buying. AGC study of two regional interconnected power systems with dead-zone influence of speed regulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 176-182.

[2] 钟毅, 陈蕊. 地区电网 AVC 系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 41-44.
ZHONG Yi, CHEN Rui. Design and realization of AVC system about area power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 41-44.

[3] 于汀, 郭瑞鹏. 基于负荷预测的地区电网电压无功控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 121-124.
YU Ting, GUO Ruipeng. Control scheme for voltage reactive power of regional power grid based on load forecast[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 121-124.

[4] 王宽, 郑勇, 陈佑健. 考虑电压稳定的自动电压闭环控制[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 31-34.
WANG Kuan, ZHENG Yong, CHEN Youjian. Automatic voltage close-loop control with voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 31-34.

[5] 付鹏武, 周念成, 王强钢, 等. 基于时滞模型预测控制算法的网络化 AGC 研究[J]. 电工技术学报，2014, 29(4): 188-195.
FU Pengwu, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Networked AGC study based on predictive control algorithm of time-delay model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 188-195.

[6] 郑文杰, 刘明波. 应用线搜索滤波器内点法求解最优协调电压控制问题[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 70-77.
ZHENG Wenjie, LIU Mingbo. Line search filter based interior point method to solve the problem of optimal coordinated voltage control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 70-77.

[7] 郭勇, 朱长胜. TBC 方式下改善蒙西电网 AGC 控制性能指标的方法[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 42-45.
GUO Yong, ZHU Changsheng. Method of improving the AGC's performance under the TBC's mode about inner Mongolia west power network[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 42-45.

[8] 杨方, 孙元章, 程林. AGC 与 AVC 协调控制和电压动态安全性[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 7-11.
YANG Fang, SUN Yuanzhang, CHENG Lin. Coordinated control of AGC redispatching and AVC to enhance voltage security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 7-11.

[9] YAO Haowei, HU Wei, XU Fei, et al. Research on damping control system of optimation coordination of AGC and AVC[C] // 2011 The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China: IEEE, 2011: 1931-1937.

[10] LI Miao, SUN Jianbo, LI Xiaoping, et al. Optimal coordinated control strategy of AGC and AVC based on hierarchical control[C] // 2011 The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China: IEEE, 2011: 1890-1895.

[11] 胡伟, 王淑颖, 徐飞, 等. 基于分层控制的 AGC 与 AVC 自动优化协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 40-45.
HU Wei, WANG Shuying, XU Fei, et al. An optimal coordinated control strategy of AGC and AVC based on hierarchical control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 25(15): 40-45.

[12] HU Wei, LU Qiuyu, XU Fei, et al. The hierarchical coordinated optimizing control of AGC and AVC system based on event-driven system[C] // UPEC 2011 46th International Universities Power Engineering Conference, Soest, Germany: UPEC, 2011: 1086-1090.

[13] 吕连洁, 汪颖, 肖先勇, 等. 基于交替迭代法的 AGC 与 AVC 协调优化控制策略研究[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 30-35.
LÜ Lianjie, WANG Ying, XIAO Xianyong, et al. An coordinated optimal control strategy of AGC and AVC based on alternating iterative method[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2012, 35(3): 30-35.

[14] 魏新颖. 省级电网实时无功优化控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
WEI Xinying. Study on large-scale power networks real-time reactive power optimal control method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[15] 燕福龙, 王芝茗, 葛维春, 等. 电力系统电压和无功功率自动控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[16] 于汀, 胡林献, 姜志勇. 多端直流系统接线和控制方式对暂态稳定性的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 87-91.
YU Ting, HU Linxian, JIANG Zhiyong. Impacts of connection and control modes of multi-terminal DC power transmission system on transient stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 87-91.

收稿日期：2014-10-23；　**修回日期：**2015-01-26

作者简介：

于　汀(1984-)，男，博士研究生，研究方向为电网调度自动控制；E-mail: yuting1984829@163.com

蒲天骄(1970-)，男，教授级高级工程师，研究方向为智能配电网仿真技术；

刘广一(1963-)，男，博士生导师，中央千人计划专家，研究方向为主动配电网技术。

(编辑　葛艳娜)