

6-1-2020

Reactive Power Coordinated Control to Reduce Grid Loss with Large-scale Wind Power Integration

Guo Peng

1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;;

Wenying Liu

1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;;

Yangqing Dan

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Economic and Technology Research Institute, Hangzhou 310007, China;;

Yalong Li

1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Reactive Power Coordinated Control to Reduce Grid Loss with Large-scale Wind Power Integration

Abstract

Abstract: It has been main mode in China that large-scale wind power has centralized into grid, but as the weakness of the grid and a lack of coordination among reactive power compensation devices, the grid loss problem outstands. Regarding to the effect of voltage reduction and reactive power flow on loss, based on characteristics of different reactive power compensation devices, *a two-stage coordinated control method was proposed. The method arranged slow discrete capacitors and reactors at long time scale whereas rapid successive static Var compensator(SVC) and static Var generator(SVG) at short time scale.* By decomposition and coordination of reactive power compensation devices, it gradually has reached the target of loss reduction. Taking a grid with large-scale wind power integration as the case, the proposed control strategy can achieve a considerable loss reduction result.

Keywords

reactive power/voltage, reactive power compensation, loss reduction, coordinated control

Authors

Guo Peng, Wenying Liu, Yangqing Dan, Yalong Li, and Liang Chen

Recommended Citation

Guo Peng, Liu Wenying, Dan Yangqing, Li Yalong, Liang Chen. Reactive Power Coordinated Control to Reduce Grid Loss with Large-scale Wind Power Integration[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 190-199.

大规模风电接入电网的无功协调降损方法

郭鹏¹, 刘文颖¹, 但扬清², 李亚龙¹, 梁琛³(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 杭州 310007;
3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050)

摘要: 大规模风电集中并网已经成为中国风电送出的主要模式, 但由于电网的薄弱和无功补偿配合的不足, 电网的损耗问题较为突出。针对电压降低和无功流动对损耗的附加作用, 依据多无功补偿的调节特性, 提出一种两阶段协调控制方法, 将缓慢离散的电容器、电抗器在长时间尺度安排, 将快速连续的静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)、静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)在短时间尺度安排, 通过多无功补偿的分解协调, 逐步实现降损的控制目标。以我国某大规模风电集中接入电网进行仿真计算, 所提控制策略能够取得一定的降损效果。

关键词: 无功电压; 无功补偿; 降损; 协调控制

中图分类号: TP761 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 01-0190-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701025

Reactive Power Coordinated Control to Reduce Grid Loss with Large-scale Wind Power Integration

Guo Peng¹, Liu Wenyong¹, Dan Yangqing², Li Yalong¹, Liang Chen³(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Economic and Technology Research Institute, Hangzhou 310007, China;
3. State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: It has been main mode in China that large-scale wind power has centralized into grid, but as the weakness of the grid and a lack of coordination among reactive power compensation devices, the grid loss problem outstands. Regarding to the effect of voltage reduction and reactive power flow on loss, based on characteristics of different reactive power compensation devices, a two-stage coordinated control method was proposed. The method arranged slow discrete capacitors and reactors at long time scale whereas rapid successive static Var compensator(SVC) and static Var generator(SVG) at short time scale. By decomposition and coordination of reactive power compensation devices, it gradually has reached the target of loss reduction. Taking a grid with large-scale wind power integration as the case, the proposed control strategy can achieve a considerable loss reduction result.

Keywords: reactive power/voltage; reactive power compensation; loss reduction; coordinated control

引言

近年来, 随着风电的接入, 电力系统运行呈现

出一些新的特征, 如大规模风电从远离负荷中心的送端电网集中接入, 送端电网网架结构相对薄弱, 电压稳定性差; 具有自动调压功能的发电厂和变电站较少, 电压支撑点少。在大规模风电远距离送出的过程中, 由于风电具有随机性与波动性, 并且分布在电网各汇集站、集群站的无功补偿设备控制特性不同、缺乏有效的配合, 容易引起电网附加损耗, 对无功电压降损控制提出了新的要求。



收稿日期: 2016-08-30 修回日期: 2016-10-09;
基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAA01B04), 国家电网公司重大项目(52272214002C), 中央高校基本科研业务费专项资金(2015XS06);
作者简介: 郭鹏(1988-), 男, 河北, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制。

<http://www.china-simulation.com>

在大规模风电集中接入电网的条件下,为了协调不同接入点、不同变电站的连续变量(Static Var Compensator, SVC、Static Var Generator, SVG)与离散变量(电容器、电抗器),以及将风电机组的无功补偿能力纳入协调控制范畴,学者们提出了多种无功电压协调控制方法。文献[1-4]提出了自动电压控制(AVC)^[1]的模式、模型与系统,其核心在于将控制目标、时间尺度、空间粒度 3 方面进行分解协调,实现由经济性到安全性、长时间尺度到短时间尺度和全局范围到局部范围的逐级推进^[2]。文献[5]提出了两层电压优化方法,第一层以较长的间隔单位对多种无功补偿进行优化,第二层在第一层动作间隔内进一步对连续变量进行优化。文献[6]提出了利用大容量离散变量对无功电压进行大幅调节;连续变量补偿小幅波动的协调控制方法。文献[7-8]设计了具有全网与局部、协作性与自治性辩证逻辑的多 Agent 结构和算法,实现了不同场站无功补偿的协调控制。而在考虑了风电机组的无功调节功能后,分层控制的方法获得广泛应用,文献[9-10]按照空间粒度由大到小建立场群层、子场层和机组层的 3 层结构,设计了控制目标逐级分解下发的控制逻辑。在变电站内部连续变量与离散变量协调控制方面,文献[11]提出了基于专家规则确定调节方向、基于“离散设备优先动作,连续设备精细调节”的控制原则确定调节量的控制方法,文献[12]提出了基于十三区图的控制方法。

文献[1-12]虽然就大规模风电接入条件下无功电压控制问题展开专门研究并取得重要成果,但没有专门从降损角度对无功电压控制问题进行论述,没有分析无功电压对损耗的作用机理,没有深入研究风电集中接入条件下多种类型无功补偿的降损控制特性,因而缺乏针对性的降损控制方法和策略。本文从无功电压对电网损耗的作用机理出发,依据电网的多成分无功补偿需求,以及离散与连续无功补偿的控制特性,提出一种两阶段协调降损控制方法,以针对性解决含风电接入电网无功电压降损控制问题。

1 大规模风电接入电网的损耗特性

1.1 无功电压对有功损耗的影响特性

设远距离交流高压线路单位长度阻抗、导纳为 $z_1 = r_1 + jx_1$, $y_1 = g_1 + jb_1$, 线路长度为 l , 距线路末端长度为 x 处的电压、电流 \dot{U} , \dot{I} 为^[13]:

$$\begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma x & Z_c \sinh \gamma x \\ \frac{\sinh \gamma x}{Z_c} & \cosh \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_2 , \dot{I}_2 为线路末端的电压和电流; $Z_c = \sqrt{z_1 / y_1}$ 是线路特性阻抗; $\gamma = \sqrt{z_1 y_1} = \beta + j\alpha$ 是线路传播系数。线路的损耗

$$\begin{aligned} P_{\text{loss}} &= \int_0^l (r_1 |\dot{I}|^2 + g_1 |\dot{U}|^2) dx = \\ &= \int_0^l r_1 \left| \frac{\sinh \gamma x}{Z_c} \dot{U}_2 + \frac{\cosh \gamma x}{Z} \dot{I}_2 \right|^2 dx + \\ &= \int_0^l g_1 \left| \cosh \gamma x \dot{U}_2 + \frac{Z_c}{Z} \sinh \gamma x \dot{I}_2 \right|^2 dx = \\ &= \frac{|\dot{U}_2|^2}{Z^2 Z_c^2} \left[\frac{r_1}{4} \left(\frac{\sinh 2\beta l}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha l}{\alpha} \right) + \right. \\ &= \frac{Z \hat{Z}_c}{4} \left(\frac{\cosh 2\beta l - 1}{\beta} + \frac{\cos 2\alpha l - 1}{j\alpha} \right) + \\ &= \frac{Z_c \hat{Z}}{4} \left(\frac{\cosh 2\beta l - 1}{\beta} - \frac{\cos 2\alpha l - 1}{j\alpha} \right) + \\ &= \frac{Z_c^2}{4} \left(\frac{\sinh 2\beta l}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha l}{\alpha} \right) \left. \right] + \\ &= \frac{g_1 |\dot{U}_2|^2}{Z^2} \left[\frac{Z^2}{4} \left(\frac{\sinh 2\beta l}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha l}{\alpha} \right) + \right. \\ &= \frac{Z \hat{Z}_c}{4} \left(\frac{\cosh 2\beta l - 1}{\beta} - \frac{\cos 2\alpha l - 1}{j\alpha} \right) + \\ &= \frac{Z_c \hat{Z}}{4} \left(\frac{\cosh 2\beta l - 1}{\beta} + \frac{\cos 2\alpha l - 1}{j\alpha} \right) + \\ &= \left. \frac{Z_c^2}{4} \left(\frac{\sinh 2\beta l}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha l}{\alpha} \right) \right] \quad (2) \end{aligned}$$

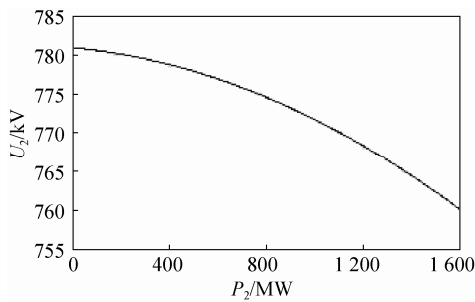
式中: $Z = \dot{U}_2 / \dot{I}_2$; 上角标“^”指复数的共轭; P_{loss} 可表示成 U_2 的二次方、负二次方和常数项之和:

$$P_{\text{loss}} = k_1 |\dot{U}_2|^2 + k_2 + k_3 / |\dot{U}_2|^2 \quad (3)$$

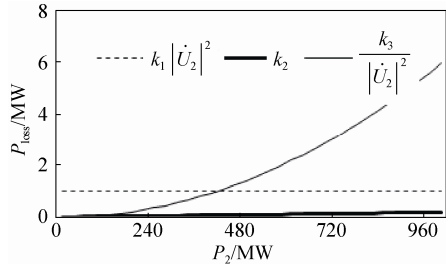
其中:

$$\begin{cases}
 k_1 = \frac{1}{4} \left[\frac{r_1}{Z_c^2} \left(\frac{\sinh 2\beta l}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha l}{\alpha} \right) + g_1 \left(\frac{\sinh 2\beta l}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha l}{\alpha} \right) \right] \\
 k_2 = \operatorname{Re} \left\{ (P_2 - jQ_2) \left[\frac{r_1}{2Z_c^2} \left(\frac{\cosh 2\beta l - 1}{\beta} + \frac{\cos 2\alpha l - 1}{j\alpha} \right) + \frac{g_1 Z_c}{2} \left(\frac{\cosh 2\beta l - 1}{\beta} - \frac{\cos 2\alpha l - 1}{j\alpha} \right) \right] \right\} = \\
 \operatorname{Re}[(P_2 - jQ_2)(\alpha_p + j\alpha_Q)] = P_2\alpha_p + Q_2\alpha_Q \\
 k_3 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{4} \left[r_1 \left(\frac{\sinh 2\beta l}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha l}{\alpha} \right) + g_1 Z_c^2 \left(\frac{\sinh 2\beta l}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha l}{\alpha} \right) \right] \\
 P_2 + jQ_2 = \dot{U}_2 \hat{I}_2
 \end{cases} \quad (4)$$

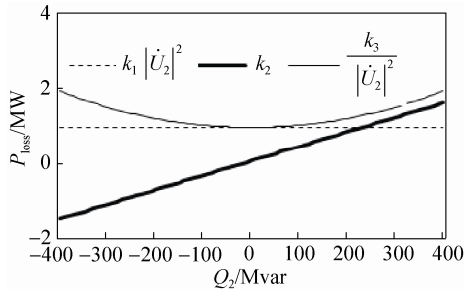
以 6×LGJK-400 为例，作 U_2 随 P_2 变化曲线，以及 P_{loss} 各分量随 P_2 和 Q_2 变化曲线，如图 1 所示。



(a) P_2 对 U_2 影响图



(b) P_2 对 P_{Loss} 影响图($Q_2=0$ Mvar)



(c) Q_2 对 P_{Loss} 影响图($P_2=480$ MW)

图 1 P_2, Q_2 对 U_2, P_{loss} 的影响图

Fig.1 The influence of P_2, Q_2 on U_2, P_{loss}

根据泰勒展开公式，当 U_2 发生 $b\%$ 的变化时， P_{loss} 的变化率

$$\Delta P_{\text{loss}} \% = 2b\% \frac{k_1 |\dot{U}_2|^2 - k_3 / |\dot{U}_2|^2}{P_{\text{loss}}} \quad (5)$$

随着 P_2 的增加，一方面， U_2 下降(如图 1(a))；另一方面， k_3 与 P_{Loss} 快速增加(如图 1(b))，且 $k_3 / |\dot{U}_2|^2$ 在 P_{loss} 的比重越来越大。电压下降 $b\%$ 可引起 P_{loss} 增加 $2b\%$ ，是调压降损的关键。

如图 1(c)所示， Q_2 在一定范围内负向增加能够减少损耗。若 $Q_2 > 0$ 或 $Q_2 < 0$ 但绝对值很大，会引起无功流动，产生附加损耗。

1.2 无功损耗的波动特性

在无功电压降损调节中，电压是主要的状态变量，而无功损耗 Q_{loss} 能反映无功电压调节需求。图 2 绘制了某大规模风电接入电网 Q_{loss} 的波动情况。 Q_{loss} 可分解为两个基本分量。其中，分量 Q_1 波动幅度小，周期短，如阵风掠过风电场引起 Q_{loss} 的小幅波动；而分量 Q_2 波动幅度大，周期长，如风电基地大面积来风或者停风引起 Q_{loss} 的大幅波动。

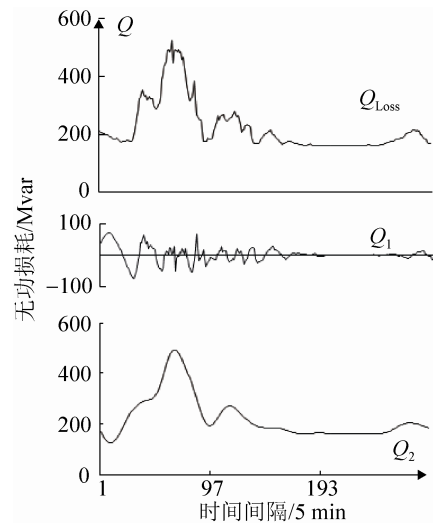


图 2 Q_{Loss} 的波动分析

Fig.2 The analysis of the fluctuation of Q_{Loss}

2 多无功补偿协调降损方法

2.1 多无功补偿协调降损策略

风电汇集站配有(低压)电容器、(低压)电抗器、

SVC, SVG 等无功补偿装置。其中, 电容器、电抗器只能分组投切, 操作耗时长、日动作次数受限, 具有离散控制特性, 适合响应 Q_2 。

SVC, SVG 是利用晶闸管进行控制的无功补偿设备, 调节时间短, 且调节次数不限, 具有连续控制特性, 适合响应 Q_1 。

在长时间尺度上, 应用电容器、电抗器响应 Q_2 , 发挥支撑电压, 兼顾减少无功流动的作用; 在短时间尺度上, SVC, SVG 响应 Q_1 , 起到减少无功流动, 同时跟踪中枢点电压的作用。多无功补偿协调降损控制策略流程图如图 3 所示。

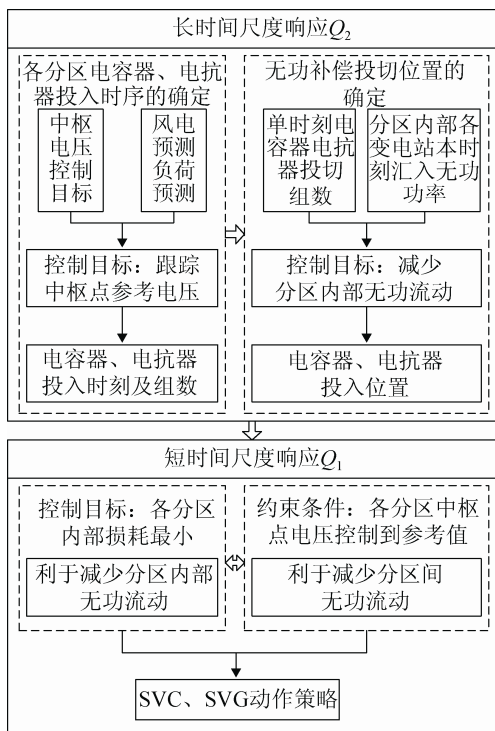


图 3 多无功补偿协调降损控制策略流程图

Fig.3 The diagram of coordinated loss-reduction control strategy of reactive power compensation devices

2.2 离散无功补偿控制方法

以小时级中枢点电压参考值^[14-15]作为离散无功补偿的控制目标。控制分区^[16]进行, 以便无功就地平衡。首先优化各分区离散无功补偿的投切时段和组数, 以追踪参考电压, 再在分区内确定离散无功补偿的投切位置, 减少无功流动。随着时间推移, 风电预测精度逐步提高, 所以应当滚动修正离

散无功补偿的动作策略。

2.2.1 离散无功补偿投切时段和组数优化模型

各分区分别选取一个中枢点, 设为 PV 节点, 给定节点电压为参考电压, 潮流计算解得的节点注入无功 Q 作为分区的无功补偿需求 $Q_q(t)$ 。

设 $C_q(t)$ 和 $R_q(t)$ 分别表示 t 时刻分区 q 投入的电容器和电抗器组数。则优化模型的目标是离散无功补偿的总输出接近于无功需求 $Q_q(t)$, 即:

$$\min g = \sum_{t=1}^{96} v[Q_q(t)] |Q_q(t) - C_q(t)Q_c + R_q(t)Q_r| \quad (6)$$

式中: $v[Q_q(t)]$ 是权重函数。当 $Q_q(t)$ 较大时, 输送的风电通常较大, 电压对网损的影响更突出。本文选用线性函数: $v[Q_q(t)] = kQ_q(t)$, $k > 0$ 。 Q_c 和 Q_r 分别是单组电容器和单组电抗器的容量。

离散无功补偿调整次数约束是:

$$\sum_{t=1}^{96} |C_q(t) - C_q(t-1)| \leq M_q \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^{96} |R_q(t) - R_q(t-1)| \leq N_q \quad (8)$$

式中: M_q 和 N_q 分别是分区 q 日内电容器、电抗器最多可调整的次数。

2.2.2 离散无功补偿优化模型的启发式求解方法

首先, 采用经验模式分解^[17](EMD)滤除 $Q_q(t)$ 的高频分量。EMD 可将 $Q_q(t)$ 分解为若干个固有模式函数 (IMF) 和一个余项 (r_n), 即 $Q_q(t) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i(t) + r_n(t)$ 。IMF 的定义是:

1) 曲线极点的数目和过零点的数目相等或相差 1;

2) 极大值点和极小值点形成的上下包络线关于横轴对称。余项是原数据中的慢变量。

设 $Q_q(t)$ 的波动幅度为 h_Q , 分区 q 日内最大无功调整量为 $M_q Q_c + N_q Q_r$, 可往返调整的次数为

$$T_c = \left\lceil \frac{M_q Q_c + N_q Q_r}{h_Q} \right\rceil, \quad (\lceil \cdot \rceil \text{ 为取整运算}), \text{ 设 } \text{IMF}_i$$

过零点数目为 c_i , 若

$$c_i \geq (3 \sim 5)T_c \quad (9)$$

则 IMF_i 为 $Q_q(t)$ 的高频分量。高频 IMF 的集合为

$$\tilde{Q}_q(t) = \sum_i IMF_i(t), c_i \geq (3 \sim 5)T_c \quad (10)$$

离散无功补偿的响应对象

$$\tilde{Q}_q(t) = Q_q(t) - \tilde{Q}_q(t) \quad (11)$$

然后, 考虑权重 $v[Q_q(t)]$, 对时间进行压缩运算, 以减少风电小发时段的调整次数。设置两个阈值 Q_{r1} 和 Q_{r2} , 划分出 $[Q_{r1}, +\infty)$, $[Q_{r2}, Q_{r1}]$ 和 $(-\infty, Q_{r2}]$ 3 个区间。从 $t=1$ 开始, 选取相邻的 3 个时段, 若 $[\tilde{Q}_q(t) + \tilde{Q}_q(t+1) + \tilde{Q}_q(t+2)]/3 \in (-\infty, Q_{r2}]$, 则将 $[t \sim t+2]$ 3 个时段合并为一个时段 \tilde{t} , 且 $\tilde{Q}_q(\tilde{t}) = [\tilde{Q}_q(t) + \tilde{Q}_q(t+1) + \tilde{Q}_q(t+2)]/3, t=t+3$; 若 $[\tilde{Q}_q(t) + \tilde{Q}_q(t+1) + \tilde{Q}_q(t+2)]/3 \in [Q_{r2}, Q_{r1}]$, 则将 $[t \sim t+1]$ 两个时段合并为一个时段 \tilde{t} , 且 $\tilde{Q}_q(\tilde{t}) = [\tilde{Q}_q(t) + \tilde{Q}_q(t+1)]/2, t=t+2$; 若 $[\tilde{Q}_q(t) + \tilde{Q}_q(t+1) + \tilde{Q}_q(t+2)]/3 \in [Q_{r1}, +\infty)$, 则 $t=t+1$ 。重复此步骤直至 $t=96$ 。

最后, 计算相邻时段无功需求的变化, 即 $\Delta\tilde{Q}_q(2) = \tilde{Q}_q(2) - \tilde{Q}_q(1), \dots, \Delta\tilde{Q}_q(\tilde{t}) = \tilde{Q}_q(\tilde{t}) - \tilde{Q}_q(\tilde{t}-1)$ 。在第 m 步, 选取 $\Delta\tilde{Q}_q$ 最大的 m 个时刻作为离散无功补偿投切时刻, 从而将一天划分成 $m+1$ 段。对于起止时刻分别是 t_{n1} 和 t_{n2} 的分段 n , 其无功需求

$$\Delta\tilde{Q}_{q,ave} = \frac{\sum_{t=t_{n1}}^{t_{n2}} \Delta\tilde{Q}_q(t)}{t_{n2} - t_{n1}}$$

。基于 $\Delta\tilde{Q}_{q,ave}$ 选取分段 n 离散

无功补偿的投入组数, 从而确定 m 个时刻离散无功补偿改变量。若离散无功补偿按照本步动作仍有剩余动作次数, 则增加分段数, 进入下一步; 否则, 将本步的分段结果和离散无功补偿投切组数作为优化结果。

2.2.3 离散无功补偿控制策略

式(6)~(8)是日前对一天 96 点的优化模型。在日内阶段依据滚动更新的风电预测, 可滚动修正剩余时段离散无功补偿投切时段和组数。那么式(6)中的 96 个时刻应改为 $96-t_0$, t_0 为当前时刻; M_q 和 N_q 应变为日剩余可动作次数 M'_q 和 N'_q 。随着预测

时间的减少, 风电预测精度逐渐提高, 使离散无功补偿的投切策略趋于准确。

若分区 q 某时刻须投入 m_q 组电容器, 设分区 q 电容器分布在变电站 $1, 2, \dots, P_q$, 计算各变电站高压侧实时流入的无功功率 $Q'(1), Q'(2), \dots, Q'(P_q)$ 。选取 $Q'(k_q) = \max[Q'(1), Q'(2), \dots, Q'(P_q)]$, 即无功最匮乏的变电站 $k_q \in [1, P_q]$ 作为优先投入电容器的变电站, 达到减少无功流动的目的。之后, 按照相同方法制定后续 m_q-1 组电容器的投入策略。类似地, 可制定退出电抗器的策略。而相反地, 投入电抗器时选取变电站实时流出的无功功率 $Q''(k_q)$ 最大的变电站做为优先动作的变电站。

2.3 连续无功补偿控制方法

短时间尺度的优化是分区进行的。首先应用 Ward 等值将区外电网简化。调节 SVC、SVG 响应网络有功的随机变化, 在维持中枢点电压在参考值的基础上, 减少无功流动。

2.3.1 Ward 分区等值

Ward 等值常应用于电力系统静态安全分析中, 在掌握分区外的实时运行信息的条件下, 等值准确度大幅提高。Ward 等值的步骤是:

- 一、读取全网各节点复电压值;
- 二、确定分区的边界节点, 形成局部节点导纳

矩阵

$$\begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EB} \\ Y_{BE} & Y_{BB} \end{bmatrix}$$

其中, E 指区外节点集, B 指边界节点集。通过高斯消元, 得到仅包含边界节点的局部导纳阵

$$Y_{BB} - Y_{BE} Y_{EE}^{-1} Y_{EB}$$

- 三、计算分区边界节点 i 上的等值注入

$P_i^{EQ} + jQ_i^{EQ}$, 公式是:

$$\begin{cases} P_i^{EQ} = \sum_{j \in i} [(U_i^0)^2 (g_{ij} + g_{i0}) - \\ \quad U_i^0 U_j^0 (g_{ij} \cos \theta_{ij}^0 + b_{ij} \sin \theta_{ij}^0)] \\ Q_i^{EQ} = \sum_{j \in i} [U_i^0 U_j^0 (b_{ij} \cos \theta_{ij}^0 + g_{ij} \sin \theta_{ij}^0) - \\ \quad (U_i^0)^2 (b_{ij} + b_{i0})] \end{cases} \quad (12)$$

式中: U_i^0 , θ_i^0 指节点 i 的电压幅值和相角; $g_{ij} + jb_{ij}$ 为与节点 i 相连的各支路电纳; $g_{i0} + jb_{i0}$ 为支路 i 的对地支路导纳; $j \in i$ 表示节点 j 与节点 i 相连接。

2.3.2 短时间尺度降损模型

控制的目标函数是各分区的有功损耗最小化:

$$\min f = P_{\text{Loss}} = \sum_{k=1}^{S_B(q)} G_k (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j) \quad (13)$$

式中: G_k 是支路 k 的电导; $S_B(q)$ 指分区 q 的支路集。

约束条件是功率方程约束、电压约束、中枢点电压控制偏差约束、连续无功补偿无功输出约束:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{S_N(q)} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{S_N(q)} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} & i \in S_N(q) \\ |U_p - U_p^{\text{ref}}| \leq \varepsilon \\ Q_{k,\min} \leq Q_k \leq Q_{k,\max} & k \in S_Q(q) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $S_N(q)$ 是分区 q 所含的节点集合; U_p 和 U_p^{ref} 是中枢点电压及参考值, ε 是电压调节死区, $U_{i,\max}$, $U_{i,\min}$ 是节点 i 电压的边界, $S_Q(q)$ 是连续无功补偿装置集合, Q_k , $Q_{k,\max}$, $Q_{k,\min}$ 分别是无功补偿装置 k 的无功输出及边界。该数学模型采用内点法^[18]求解。

3 算例

3.1 算例来源

本文选取一个典型风电集中并网外送系统——甘肃西部电网作为研究对象, 如图 4 所示。截止 2015 年底, 该地区风电装机 8 500 MW, 通过敦煌=酒泉=河西=甘肃主网与敦煌=青海两条 750 kV 通道外送。应用文献^[16]的方法, 将甘肃西部电网分区, 结果如图 4 所示。分区①、分区②、分区③的中枢点分别为敦煌 750 kV 变电站高压侧、酒泉 750 kV 变电站高压侧和河西 750 kV 变电站高压侧。不失一般性, 本节的算例主要针对分区①展开。分区①的离散和连续无功补偿装置的配置情况分别如表 1 所示。

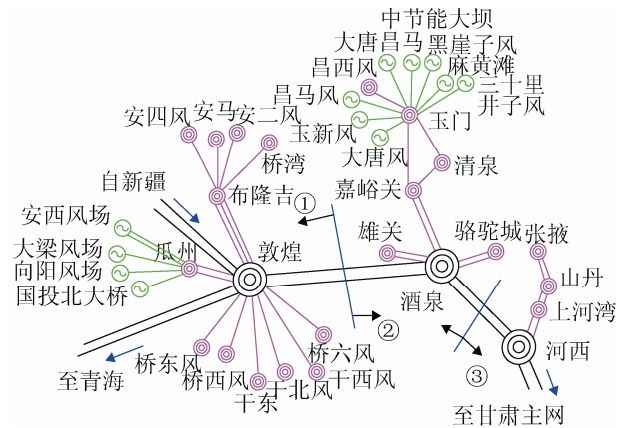


图 4 甘肃西部局部电网示意图

Fig.4 Western Gansu grid diagram

表 1 分区①无功补偿配置情况

Tab.1 The configuration of reactive power compensation devices at Zone①

(a) 离散无功补偿配置情况 /Mvar					
厂站名称	电容器		电抗器		
敦煌变	8×60		6×60		
合计	480		360		
(b) 连续无功补偿配置情况 /Mvar					
场站	类型	调节范围	场站	类型	调节范围
干东	SVC	-22.5~126	安二	SVG	-40~40
干西	SVC	-31.5~105	安马	SVG	-32~32
桥西	SVC	-27~90	安四	SVG	-40~40
桥东	SVG	-40~40	桥六	SVG	-40~40
桥湾	SVC	-27.9~129.6			
干北	SVG	-32~32	总计		-332.9~674.6

注: 以发出感性无功功率为正

3.2 离散无功补偿动作情况及控制效果展示

首先从全网角度, 应用文献^[14]的方法计算一日电压中枢点的电压参考值。受篇幅所限, 不再展示。

下面着重分析分区①的无功电压控制情况。根据中枢点电压参考值, 首先计算各时段无功补偿需求如图 5(a)所示。图 5(b)应用 EMD 滤除无功补偿需求的高频分量。取 $Q_{r1}=320$ Mvar 和 $Q_{r2}=160$ Mvar, 对无功需求少的时段进行压缩处理, 如图 5(c)所示。敦煌变共有 8 组电容器, 按照日最多调节次数为 12 进行控制, 可确定调节时段为: 13:30, 13:00, 23:00, 9:00, 12:30, 14:30(2 组电容器动作), 4:00, 10:00, 4:30, 22:00 和 0:30, 如图 5(d)所示。

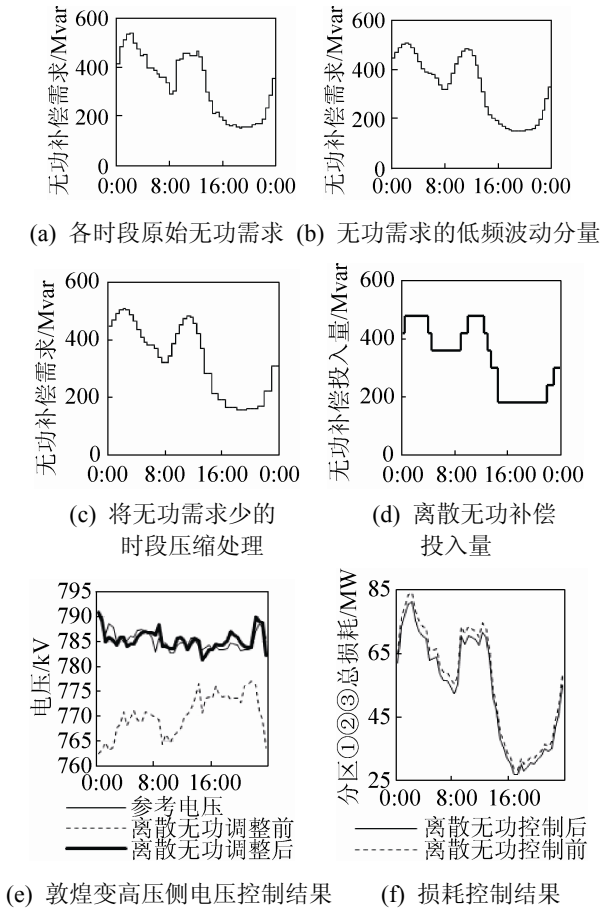


图5 离散无功补偿动作策略确定过程及效果图
Fig.5 The decision progress and effect of discrete reactive power source

按相同的办法制定分区②和③离散无功补偿控制策略,可以得到调节后,分区①中枢点电压控制结果和图4电网损耗变化情况,如图5(e)(f)所示。通过对离散无功补偿控制,达到了提升电压的控制目标,减少了损耗中 $k_3 / |\dot{U}_2|^2$ 分量。

3.3 连续无功补偿动作情况及控制效果展示

在 1:30-1:55 以 5 min 为间隔对分区①的连续无功补偿装置进行优化。1:30 分区①的母线、线路、变压器及固定高压电抗器(不可投切)、电容器的数据如附表 1~3 所示。1:35-1:55 分区①各母线的注入功率如附表 4 所示。

对分区①首先进行 Ward 等值,等值前敦煌变高压侧母线的自导纳为 16.720-587.551i (p.u.),等值后为 0.369-200.584i(p.u.),附表 1, 4 中该母线的功率均为等值功率,加粗标示。

对分区①进行潮流计算时,在敦煌变高压侧增设虚拟平衡机,其有功出力用于平衡微小的网损波动量,无功出力的大小与其电压 V 有关。当潮流计算经过 2 轮迭代后,每完成一步迭代后均根据计算得到的无功输出 Q 按照 $\Delta V = -kQ$ 更新平衡节点的电压 V ,直至虚拟机的无功输出 $|Q| < \epsilon$,其中, k 取文献[7](4-4)式中的无功电压灵敏度。而 2.3.2 节的优化模型本身弱化了平衡节点、PQ 节点的区分,无需增设虚拟平衡机。

通过内点法获得不同变电站下连续无功补偿动作情况如图 6(c)所示。控制后,一方面,如表 2(a)所示,能够减少各 330 kV 变电站向敦煌变注入无功功率的幅值,降低了分区①内部无功流动引起的损耗部分;1:30 的降损效果见表 2(a)最后一列下方,1:35~1:55 降损效果如表 2(b)所示。另一方面,如图 6(a)所示,经 3.2 节离散无功补偿控制后,中枢节点电压仍偏离参考值,分区①中枢点敦煌变高压侧电压低于参考电压,而分区②中枢点酒泉变高压侧电压高于参考电压,从而诱发无功功率从分区②流向分区①。当分区①和②均通过连续无功补偿将中枢点控制到参考值时,可有效削减敦煌-酒泉线无功流动,削减情况及降损效果见表 2(c)。

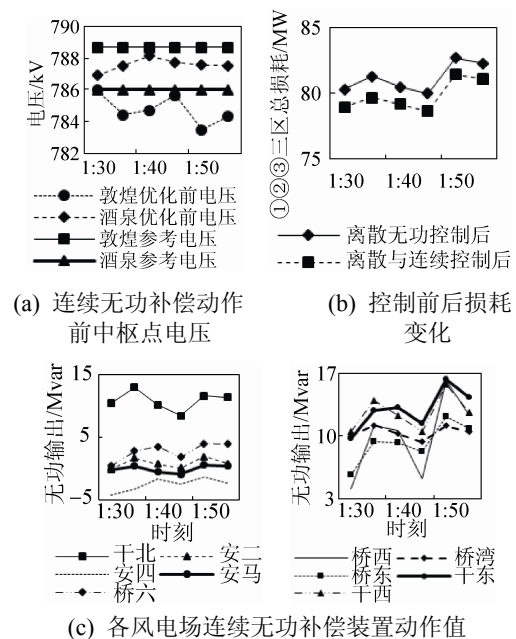


图6 连续无功补偿控制过程及效果
Fig.6 The decision progress and effect of continuous reactive power source

表 2 连续无功补偿控制过程及效果
Tab.2 The decision progress and effect of continuous reactive power source

(a) 1:30 多变电站流向敦煌变的无功功率及损耗/Mvar, MW					
起始站	桥六	干北	干东	干西	
控制前	-28.6	7.6	34.6	-165.4	
控制后	1.8	0.2	-0.7	0.2	
起始站	桥西	桥东	布隆吉	分区①损耗	
控制前	76.6	-17.3	123.9	22.47	
控制后	-0.5	-1.0	19.6	21.55	
(b) 1:30~1:55 分区①损耗对比 /MW					
对比	1:35	1:40	1:45	1:50	1:55
控制前	23.41	22.01	21.87	24.67	24.09
控制后	22.30	20.90	20.95	23.59	23.10
(c) 敦煌-酒泉双回线无功流动及损耗 /Mvar, MW					
时刻	对比	两侧注入线路无功		损耗	
		敦煌侧	酒泉侧		
1:30	控制前	-816.1	-553.1	6.546	
	控制后	-695.7	-682.1	6.482	
1:35	控制前	-870.1	-464.6	6.910	
	控制后	-680.8	-667.5	6.768	
1:40	控制前	-887.5	-459.3	6.816	
	控制后	-685.3	-671.9	6.680	
1:45	控制前	-857.2	-515.1	6.549	
	控制后	-696.5	-683.0	6.466	
1:50	控制前	-875.9	-420.5	7.325	
	控制后	-663.5	-650.6	7.126	
1:55	控制前	-861.6	-455.1	7.100	
	控制后	-671.9	-658.8	6.948	

注: 表中线路的充电功率可由两侧变电站的固定电抗器平衡; 线路(单条)参数是: 电阻为 3.77 Ω , 电抗为 78.06 Ω , 1/2 电纳为 0.000 635 s.

通过精细调节连续型无功补偿, 在分区①内部通过潮流优化减少无功流动, 在分区①②之间通过跟踪参考电压减少无功流动, 从而降损。连续无功补偿作用后, 图 4 网络在 1:30~1:55 的损耗变化如图 6(b)所示。

4 结论

本文提出了含大规模风电接入电网的多时间尺度无功协调控制方法:

1) 长时间尺度上, 通过控制电容器、电抗器等离散无功补偿, 达到提升中枢纽点电压、从而降低电网损耗的目的;

2) 短时间尺度上, 通过控制 SVC, SVG 等连续无功补偿, 达到减少无功流动、从而降低电网损耗的目的。

通过实例仿真分析表明, 本文提出的方法能够很好地协调离散和连续无功补偿的动作, 有效提高大规模风电接入电网的经济运行水平。

参考文献:

- [1] 郭庆来, 张伯明, 孙宏斌, 等. 电网无功电压控制模式的演化分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(1): 16-19.(GUO Qinglai, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. Analysis on evolution of reactive power and voltage control methods [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(1): 16-19.)
- [2] 孙宏斌, 郭庆来, 张伯明, 等. 面向网省级电网的自动电压控制模式 [J]. 电网技术, 2006, 30(增 2): 13-18. (Sun Hongbin, Guo Qinglai, Zhang Boming, et al. Automatic voltage control scheme for large-scale power networks [J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 13-18.)
- [3] 李端超, 陈实, 吴迪, 等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计及实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 20-22.(LI Duan-chao, CHEN Shi, WU Di, et al. Design and Implementation of AVC System for Anhui Power Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 20-22.)
- [4] 王智涛, 胡伟, 夏德明, 等. 东北 500 kV 电网 HAVC 系统工程设计与实现 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 85-88.(WANG Zhi-tao, HU Wei, XIA De-ming, et al. Design and application of HAVC system in the 500 kV power grid of northeast China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 85-88.)
- [5] 王洪涛, 刘雪芳, 俞志皓, 等. 含风电场群的区域电网两层多阶段电压协调控制方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 1-7, 13.(Wang Hongtao, Liu Xuefang, Yun Zhihao, et al. Two-tier and multi-stage voltage coordination control method for regional power grid with wind farms [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 1-7,13.)
- [6] 陈惠粉, 乔颖, 闵勇, 等. 风电场动静态无功补偿协调控制策略 [J]. 电网技术, 2013, 37(1): 248-254. (Chen Huifen, Qiao Ying, Min Yong, et al. Study on coordinated control strategy of dynamic and static reactive compensation in wind farm [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 248-254.)
- [7] 吴耀昊. 基于多代理的风电集群接入电网无功电压控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.(Wu Yao hao. Research on Reactive Voltage Control Strategy Wind Power Clustered Access Based on Multi-Agent [D].

Beijing, China: North China Electric Power University, 2014.)

[8] 徐鹏, 刘文颖, 许园园, 等. 基于多代理的无功电压协调控制模型在含风电场电网中的应用 [J]. 中国电力, 2015, 48(3): 133-138. (XU Peng, LIUWenyong, XU Yuanyuan, et al. The Application of Reactive Power and Voltage Coordinated Control Based on Multi-agent in Grid Integrated with Wind Farms [J]. Electric Power, 2015, 48(3): 133- 138.)

[9] 崔杨, 彭龙, 仲悟之, 等. 双馈型风电场群无功分层协调控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4300-4307. (CUI Yang, PENG Long, ZHONG Wuzhi, et al. Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4300-4307.)

[10] Ahmidi A, Guillaud X, Besanger Y, et al. A multilevel approach for optimal participating of wind farms at reactive power balancing in transmission power system [J]. IEEE Systems Journal (S1932-8184), 2012, 6(2): 260-269.

[11] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 协调二级电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19-24.(Guo Qinglai, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Study on coordinated secondary voltage control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 19-24.)

[12] 信鹏飞, 李鹏, 杨世旺, 等. 双馈式风力发电机与 VQC 的电压无功协调控制方法研究 [J]. 陕西电力, 2013, 41(7): 16-20. (XIN Pengfei, LI Peng, YANG Shiwang, et al. Study on coordinated control method for DFIG and VQC [J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(7): 16-20.)

[13] 陈珩. 电力系统稳态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.(Chen Heng. Power system steady state analysis [M]. Beijing, China: China electric Power Press, 2007.)

[14] 严正. 最优潮流新算法的研究-交叉逼近法的理论与实践 [D]. 北京: 清华大学, 1991.(YAN Zhen. A New Algorithm for Optimal Power Flow: Theory and Practice of Alternate Approximating Method [D]. Beijing, China: Tsinghua University, 1991.)

[15] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83-87.(Guo Qinglai, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Research and development of AVC system for Jiangsu power networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 83-87.)

[16] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40, 54.(Guo Qinglai, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in Mvar control space [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40, 54.)

[17] 刘兴杰, 米增强, 杨奇逊, 等. 一种基于 EMD 的短期风速多步预测方法 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(4):

165-170.(Liu Xingjie, Mi Zengqiang, Yang Qixun, et al. A novel multi-step prediction for wind speed based on EMD [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 165-170.)

[18] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.(Wang Xifan, Fang Wanliang, Du Zhengchun. Modern electric power analysis [M]. Beijing, China: Technology Press, 2003.)

附录:

附表 1 1:30 分区①的母线数据(MW, Mvar)

No.	母线名	发电		负荷	
		有功	无功	有功	无功
1	桥西.330.1	0	0	0	0
2	桥西.35.1	59.37	38.96	0.58	0
3	桥西.35.2	100.5	10.37	0.99	0
4	桥西.35.3	109.9	44.53	1.09	0.19
5	敦煌.750.1	0	0	2504	394
6	敦煌.330.1	0	0	-1.25	-35.6
7	敦煌.60.1	0	0	0	0
8	敦煌.60.2	0	0	0	0
9	桥湾.330.1	0	0	0	0
10	桥湾.35.1	156.5	23.84	1.56	0
11	桥湾.35.2	105.5	24.03	1.05	0
12	桥东.330.1	0	0	0	0
13	桥东.35.1	172.3	-3.49	1.71	0
14	桥东.35.2	51.08	-3.98	0.50	0
15	干东.330.1	0	0	0	0
16	干东.35.1	91.31	14.64	0.90	0
17	干东.35.2	96.57	36.02	0.95	0.17
18	干东.35.3	98.84	1.08	0.98	0
19	干西.330.1	0	0	0	0
20	干西.35.1	186.4	-81.2	1.85	0
21	干西.35.2	67.62	-64.5	0.67	0
22	桥湾.35.3	47.46	9.08	0.47	0.04
23	干北.330.1	0	0	0	0
24	干北.35.1	211.6	19.14	2.11	0
25	干北.35.2	32.62	2.49	0.32	0
26	安二.330.1	0	0	0	0
27	安二.35.1	145.6	-20.6	0	0
28	安二.35.2	145.6	-20.6	0	0
29	安四.330.1	0	0	0	0
30	安四.35.1	76.02	-0.35	0	0
31	安四.35.2	76.02	-0.35	0	0
32	安马.330.1	0	0	0	0
33	安马.35.1	204.4	64.5	2.04	0
34	桥六.330.1	0	0	0	0
35	桥六.35.1	51.65	-13.5	0	0
36	桥六.35.2	48.08	-3.02	0	0
37	桥六.35.3	41.57	-9.87	0	0
38	瓜州.330.1	0	0	-139	3.71
39	红柳.330.1	0	0	0.89	-54.5
40	布隆吉.330.1	0	0	-29.3	-24.3
41	敦煌 1 变.0	0	0	0	0
42	敦煌 2 变.0	0	0	0	0

附表 2 分区①的支路数据(p.u.)

支路号	首末端 母线号	支路 电阻	支路 电抗	0.5 充电容 容电纳	变比(分接头 在首端)
1	6-38	0.000 24	0.001 1	0.0064	1
2	6-38	0.000 23	0.001 7	0.0050	1
3	15-6	0.001 68	0.012 2	0.0762	1
4	19-6	0.001 89	0.013 7	0.0858	1
5	1-6	0.000 42	0.003 0	0.0191	1
6	6-12	0.002 02	0.012 6	0.0827	1
7	23-6	0.001 89	0.013 7	0.0857	1
8	39-6	0.002 62	0.020 4	0.1383	1
9	39-6	0.002 60	0.020 6	0.1392	1
10	6-40	0.002 64	0.016 2	0.1065	1
11	40-26	0.001 48	0.012 2	0.0816	1
12	6-40	0.002 63	0.016 2	0.1026	1
13	40-32	0.002 14	0.014 4	0.0986	1
14	40-29	0.001 08	0.006 4	0.0498	1
15	9-40	0.001 82	0.011 6	0.0770	1
16	6-34	0.002 16	0.013 5	0.0878	1
17	1-2	0.000 9	0.058 8	0	1.1
18	1-3	0.000 9	0.058 8	0	1.1
19	1-4	0.000 9	0.058 8	0	1.1
20	9-10	0.000 9	0.058 8	0	1.1
21	9-11	0.000 9	0.058 8	0	1.1
22	9-10	0.000 9	0.058 8	0	1.1
23	12-13	0.002 5	0.054 6	0	1.1
24	12-14	0.002 5	0.054 6	0	1.1
25	12-13	0.002 5	0.054 6	0	1.1
26	15-16	0.000 9	0.058 8	0	1.1
27	15-17	0.000 9	0.058 8	0	1.1
28	15-18	0.000 9	0.058 8	0	1.1
29	19-20	0.000 9	0.058 8	0	1.1
30	19-20	0.000 9	0.058 8	0	1.1
31	19-21	0.000 9	0.058 8	0	1.1
32	9-22	0.000 9	0.058 8	0	1.1
33	23-24	0.000 93	0.058 8	0	1.1
34	23-24	0.000 93	0.058 8	0	1.1
35	23-25	0.000 9	0.058 8	0	1.045 5
36	26-27	0.000 55	0.029 1	0	1.1
37	26-27	0.000 55	0.029 1	0	1.1
38	26-28	0.000 55	0.029 1	0	1.1
39	26-28	0.000 55	0.029 1	0	1.1
40	29-30	0.000 52	0.030 2	0	1.040 5
41	29-31	0.000 52	0.030 2	0	1.040 5
42	32-33	0.000 59	0.028 9	0	1.1
43	32-33	0.000 59	0.028 9	0	1.1
44	32-33	0.000 59	0.028 9	0	1.1
45	34-35	0.000 48	0.029 6	0	1.1
46	34-36	0.000 48	0.029 6	0	1.1
47	34-37	0.000 48	0.029 6	0	1.1
48	5-41	0.000 02	0.009 6	0	1.02
49	6-41	0.000 01	-0.00 1	0	1.019 3
50	7-41	0.000 07	0.018 1	0	0.954 5
51	5-42	0.000 02	0.009 6	0	1.02
52	6-42	0.000 01	-0.00 1	0	1.019 3
53	8-42	0.000 07	0.018 1	0	0.954 5

附表 3 分区①的并联电容、电抗数据

序号	母线	电纳/p.u.	序号	母线	电纳/p.u.
1	38	-0.744	6	7	0.6
2	5	-0.590	7	8	0.6
3	7	0.6	8	8	0.6
4	7	0.6	9	8	0.6
5	7	0.6	10	8	0.6

注: 附表 2, 3 中电纳列中数值容性取正, 感性取负。电压基准值系列为 750 kV, 330 kV, 110 kV, 60 kV, 35 kV, 功率基准值为 100 MVA。

附表 4 各节点注入功率变化表(MW, Mvar)

项目	1:35	1:40	1:45	1:50	1:55
2_有功	57.45	55.34	54.55	73.15	59.29
3_有功	95.55	99.19	92.04	86.50	91.81
4_有功	101.5	116.1	109.8	106.4	104.1
5_有功	-2 542	-2 529	-2 512	-2 619	-2 600
6_有功	-1.50	1.37	1.44	0.57	2.55
10_有功	154.2	137.8	138.9	137.8	159.0
11_有功	96.08	88.33	97.82	100.3	94.87
13_有功	206.1	172.8	208.8	238.7	227.6
14_有功	64.42	67.04	47.85	64.14	65.98
16_有功	88.75	101.9	94.79	91.18	89.72
17_有功	88.89	111.2	98.62	97.57	94.19
18_有功	92.40	102.2	84.91	100.3	97.5
20_有功	198.3	189.3	171.2	193.4	176.3
21_有功	69.61	78.19	74.04	69.33	65.83
22_有功	45.50	46.71	49.15	47.15	48.78
24_有功	205.9	198.6	183.4	185.7	193.2
25_有功	30.31	34.10	29.07	31.70	31.29
27_有功	157.8	137.1	142.2	153.4	148.8
28_有功	157.8	137.1	142.2	153.4	148.8
30_有功	76.37	78.55	92.27	95.79	84.96
31_有功	76.37	78.55	92.27	95.79	84.96
33_有功	196.7	207.0	179.9	204.8	210.1
35_有功	54.65	55.95	60.74	52.45	58.61
36_有功	51.10	52.71	57.62	49.23	55.40
37_有功	44.63	46.80	51.91	43.34	49.52
38_有功	129.9	147.6	149.4	132.9	137.8
39_有功	1.88	-15.8	6.94	7.55	15.82
40_有功	26.22	27.05	23.43	32.48	28.90
2_无功	44	36.46	35.13	43.53	40.26
3_无功	9.64	11.75	13.24	16.68	5.17
4_无功	43.61	43.23	43.65	48.14	46.06
5_无功	-405	-415	-403	-403	-396
6_无功	34.69	34.71	33.74	34.14	34.88
10_无功	25.25	21.7	23.58	25.21	28.77
11_无功	22.68	20.63	29.14	28.34	26.52
13_无功	-5.93	-1.93	-3.31	-3.15	-2.3
14_无功	-4.62	-6.41	0.33	-1.99	-3.92
16_无功	17.41	19.48	22.72	22.6	20.12
17_无功	37.97	35.51	37.89	39.10	38.38
18_无功	2.63	2.15	5.1	6.31	5.59
20_无功	-78.9	-79.0	-76.1	-76.9	-76.2
21_无功	-62.9	-63.1	-62.0	-59.1	-60.3
22_无功	11.93	11.32	12.50	15.70	14.34
24_无功	20.06	21.78	11.63	11.91	14.36
25_无功	8.37	9.87	10.69	12.63	10.44
27_无功	-24.4	-25.7	-25.8	-22.9	-22.2
28_无功	-24.4	-25.7	-25.8	-22.9	-22.2
30_无功	3.01	-1.05	-8.22	-4.92	-0.98
31_无功	3.01	-1.05	-8.22	-4.92	-0.98
33_无功	69.52	83.90	54.14	54.19	53.56
35_无功	-12.2	-14.7	-13.6	-8.7	-12.3
36_无功	0.24	2.32	5.45	3.43	3.83
37_无功	-8.53	-11	-9.91	-5.08	-8.67
38_无功	-3.11	-0.85	-4.38	4.71	2.98
39_无功	54.68	55.80	54.75	54.71	54.93
40_无功	24.41	25.50	24.97	23.66	23.86