

# 计及加权网络拓扑的备用购买双层决策

张国芳<sup>1,2</sup>, 刘俊勇<sup>1,2</sup>, 吕林<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065, 2. 四川省智能电网重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:**为反映大电网多市场环境下对电网运输的不确定影响,提出了加权网络拓扑分析下的电力交易对备用服务的购买模型。以备用服务为研究对象,基于线路电抗的加权电网拓扑,考虑关键线路的备用可用率,构造了考虑阻塞风险的备用获取模型,并利用双层规划进行全局优化计算得最优备用分配。该模型通过带阻抗权重的将电网简化为有向加权稀疏连通图,从输电通道裕度角度和发电容量归属建立脆弱深度指标,定量反映不同交易注入下通道受扰程度。上层优化以供电公司效用最大化为目标,下层以备用成本最小化为目标,以通道受扰程度为约束。算例结果表明备用通道分析可方便调度人员明确通道冗余度状况,加大了安全性和经济性。

**关键词:**备用服务;加权网络拓扑;双层规划;通道裕度

**Abstract:** In order to reflect the influence of uncertainty on transmission in the large grid and multi-market environment, the trading model of reserve services in the weighted grid is proposed. Based on a weighted network topology, considering the availability of critical lines, the reserve acquisition model with congestion risk is put forward, and bi-level programming is used to optimize the reserve allocation. The model simplifies the grid with impedance weight to the directed weighted connected graph, and establishes the vulnerability indicators from the transmission channel margins and capacity attribution to quantitatively reflect the condition of different channels disturbed after the injection. Upper optimizing goal is maximizing the effectiveness of the power company, while the lower targets are minimizing the purchasing cost as terms of restriction. The example shows that the analyses of reserve channels can help the dispatchers make clear the channel margins, and enhance the safety and economy.

**Key words:** reserve services; weighted network topology; bi-level programming; channel margins

**中图分类号:** TM769 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0048-05

## 0 引言

电力系统的快速发展,对电网安全性及可靠性要求越来越高,备用服务作为辅助服务中的一项传统保障方式已被不少学者研究,但随着电力市场开放、电网互联,备用的市场模式研究显得十分重要。多品种交易使得发电商或用户需更加直观、精确地了解网络使用程度,规避信息不透明度和功率流动随意性,合理购买备用成为用户最为关注的问题。

文献[1]介绍了备用定义、分类、定价和获取方式。文献[2-3]以备用容量为对象,采用概率等方法优化购电费用。文献[4-7]以备用电价对象,介绍了旋转备用主要的竞价模式。但都尚未考虑网络阻塞情况,使备用购买变成“可发不可用”。加权网络拓扑作为新兴理论为网络分析提供了全新技术发展空间。文献[8]验证了考虑电网物理特性的加

权网络拓扑分析的可行性。新理论的引用避免了传统的潮流归属计算方法中静态以及无损处理<sup>[9]</sup>的问题。

基于加权电网拓扑分析,研究发电机组对潮流贡献,构建一种兼顾输电性和经济性的购电双层优化模型。该双层优化模型的上层以在一定收益下供电公司的风险最小化为目标,下层则以备用成本最小化为目标,综合考虑了负荷的不确定性和备用调用率,结合发电机贡献的影响确定备用交易计划。算例表明通道分析可帮助决策人员明确备用通道冗余度从而制定决策使利益最大化。

## 1 加权网络拓扑演化

### 1.1 分权通道拓扑

从图论角度,分析输电网络通道时可不考虑网络元件的特性,可将电力系统抽象为一个由  $n$  个顶点和  $L$  条边构成的稀疏连通图  $F=(N, L)$ , 其中  $N$  表示

m 个发电厂和 k 个负荷的顶点集合, L 表示代表支路集合。

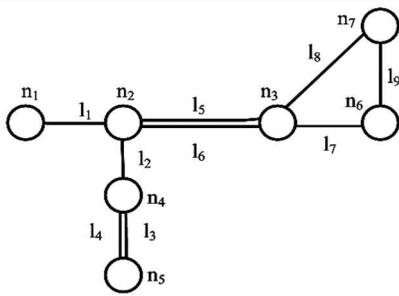


图 1 一电网拓扑结构

### 1.2 通道电流贡献归属分量

将系统中所有发电机等值成节点注入电流源, 所有负荷等值成阻抗。设第 q 台发电机的输入功率和节点电压分别为  $S_{Gq}$  和  $U_{Gq}$ , 则发电机  $G_q$  的等值注入电流  $I_{Gq}$  为

$$I_{Gq} = (S_{Gq} / U_{Gq})^* \quad (1)$$

$$Z_{Lh} = 1 / Y_{Lh} \quad (2)$$

式中, 符号 “\*” 表示共轭;  $Y_{Lh}$  为负荷  $L_h$  的等值导纳。得到系统的等值模型如图 2 所示。

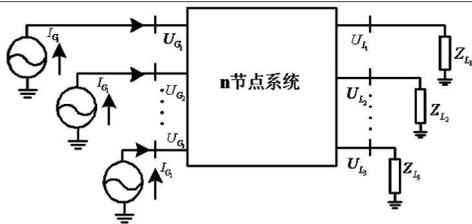


图 2 系统等值模型

系统中输电线路采用  $\pi$  型等值电路, 如图 3 所示。图中,  $Z_l = r_l + jx_l$  为线路 l 的等值阻抗;  $x_{l0} = x_{l0}$  为对地电容对应的等值电抗的一半;  $\Delta S_{il0}$ 、 $\Delta S_{jl0}$  分别为节点 i、j 侧对地支路的复功率损耗;  $S'_{ij}$  和  $S''_{ij}$  分别为线路 l 的联络支路首末端复功率;  $S_i$  为从节点 i 流入线路 l 首端的复功率;  $S_j$  为从线路 l 末端流入节点 j 的复功率;  $U_i$  和  $U_j$  为节点 i 和 j 的电压, i 和 j 表示线路 l 的首末端节点号。上述功率和电压向量由稳态潮流解事先确定。

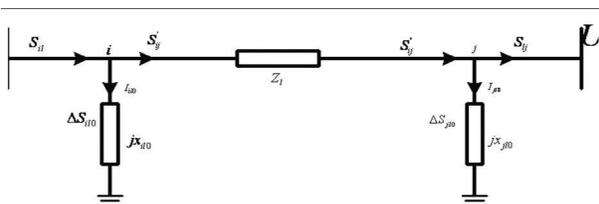


图 3 线路等值模型

发电机  $G_q$  对线路 l 首端的复功率潮流为

$$S_{iGq} = (I_{iGq} \cdot I_{ij}) Z_{ij}^{*} \quad (3)$$

发电机  $G_q$  对线路 l 的联络支路首端, 末端潮流为

$$S'_{ijGq} = S_{iGq} - \Delta S_{ijGq} \quad (4)$$

$$S''_{ijGq} = S'_{ijGq} - \Delta S_{Gq} \quad (5)$$

发电机  $G_q$  对线路 l 末端的复功率潮流为

$$S_{jGq} = S''_{ijGq} - \Delta S_{jGq} \quad (6)$$

电网实际运行中, 电源节点和负荷节点之间存在多条路径, 电力供应由多个电源节点同时完成。在以上分析的基础上提出了“潮流权数”概念, 从电路理论出发计算出各交易对通道的利用情况, 同时可以衡量节点在网络中的重要度。

$$P_e(i, j) = \sum_{\substack{e \in G \\ f \in L}} \frac{n_{ij}(e)}{n_{ij}} \sqrt{W_x W_c} S^{dt}(i, j) \quad (7)$$

### 1.3 关键支路

多市场环境, 发电机组或供电公司需要电能, 在电网中的流动情况, 以此来衡量对输电网的使用程度, 为输电费用的合理分配提供理论依据<sup>[10]</sup>, 也为备用服务提供定价依据, 须进一步明确各发电机在通道内占用的潮流比例。若某一备用交易潮流 ( $d$ ) 在支路 l 潮流权数超过  $\xi$  则备用交易对所传输路径影响大, 调用时造成阻塞的可能性也越大, 为关键支路  $L_\xi$ 。

## 2 双层最优备用容量的确定

发电机组参与备用市场竞争, 同时会产生机会成本。为了降低备用的期望成本, 供电公司和大用户不能只考虑容量或电量竞价, 必须估计备用在实时运行时被使用的可能性和大小。因此备用竞价可表示为  $R_i + xE_i$ , 其中  $R_i$  为容量竞价,  $E_i$  为电量竞价,  $x$  表示备用调用率, 即被调用的备用容量与获取的备用容量之比。为了保证竞价过程的透明性, 系统应在发电商提交竞价前确定  $x$ 。若直接交易传输过程中经过关键线路, 则需考虑额外的线路占用费用  $Q$  以途经的关键线路条数累加。故系统中备用购买总成本由容量成本和电量成本、关键线路费用三部分构成, 即  $C = C(R) + xC(E) + nQ$ 。

研究对象为长期合同市场中, 备用直接交易市场 and 网购备用市场的组合优化。在此阶段合同市场内可以稳定长期电能价格, 而电量电价按月出清, 与备

用调用率有关,只能基于随机模拟进行估计。因此总购电成本  $C$  是随机变量。

设电量由暗投标产生,设为  $Q_a, Q_b$ , 则备用市场总收益为

$$B = p_a Q_a + p_b Q_b - C \quad (8)$$

$$\text{其中, } p_a = R_a + xE_a, \quad p_b = R_b + xE_b$$

购电组合的损失  $F$  是负的收益。这里以购电组合损失的 CVaR 值表示组合风险,则备用市场应适当分配备用容量,指导购买,使整体利益最大化,同时风险最小化。并且优先网购市场,保证系统内大多数用户供电安全,以有效备用为交易限度,危险支路数为影响上限。购电组合策略为  $S = \{Q_a, Q_b\}$ , 借助证券投资组合理论,以最小化风险为目标,则采用混合市场中的备用容量采购双层优化模型如下。

$$\begin{cases} \min \text{CVaR}(B) \\ \text{s.t. } E(B) > B_0 \\ S^{\min} < S < S^{\max} \\ \begin{cases} \min p_a Q_a \\ \text{s.t. } Q_{i \min} < Q_i < Q_{i \max} \\ L_i < L_{i \max} \\ \left\{ \mathbb{R} \left\{ \sum_{i=1}^N [p_i + r_i d_i] \geq D(t) \right\} \geq \alpha \right. \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\text{CVaR}(B)$  表示收益  $B$  的 CVaR 值,计算方法可参见文献 [12],  $E(\cdot)$  表示随机变量的均值;  $B_0$  表示期望最小收益。这里为保证备用交易可行性,规避阻塞风险,在下层优化约束条件中加入关键支路数  $L_i$ , 以及备用需求约束。  $r_i$  为机组  $i$  被选中的旋转备用容量;  $d_i$  为机组  $i$  的状态变量;  $\left\{ \mathbb{R} \left\{ \sum_{i=1}^N [p_i + r_i d_i] \geq D(t) \right\} \geq \alpha \right.$  表示在计及负荷预测误差的情况下,系统所获取的备用容量满足系统安全运行要求的概率;  $\alpha$  为给定的、需要满足系统备用容量要求的置信度水平。

所遇到的问题是:只有市场出清之后,才能得知备用调用量,从而计算采用概率函数进行描述。这种估计基于可获得的历史竞价数据,出清价格以及其他信息,采用统计分析方法进行。

上述双层购电组合模型的第一层表示在一定的收益  $B_0$  下最小化购电风险。第 2 层供电公司在网络安全传输的前提下最小化备用费用。该模型的决策机制假定上层的决策者供电公司,首先指定购电组合  $S$  然后下层的决策者供电公司在此前提下做出自己最优的“合理反应”,即备用市场的价格和电量。再

反馈至上层模型,计算在此指定的  $P_a, Q_a$  下收益  $B$  和 CVaR 值,因此,这种主从递阶的决策问题比一般的单层决策问题更为复杂。

### 3 基于粒子群优化算法的模型求解

在上述的双层决策系统中,其最大特点是一个双层的随机优化问题。由于文中备用调用率随机产生,下层决策中也存在随机变量,因此需采用蒙特卡罗模拟求解。它是一类通过随机变量的统计试验和随机模拟来求解物理、数学、经济管理和工程技术领域中的近似解的数值方法,非常适合求解异常复杂。粒子群算法 (PSO) 是基于种群的进化演化算法,具有全局收敛性和随机搜索性,且结构简单控制参数少。设计了一种基于蒙特卡罗模拟和 PSO 算法的求解双层优化问题的 Monte-PSO (简称为 MP 算法) 用来求解该双层优化问题。

#### 3.1 算法介绍

##### 3.1.1 数据抽样模拟

在获得随机变量  $x_a, x_b$  的概率分布函数的基础上,利用蒙特卡罗随机产生大量的样本值 ( $x_a, x_b$ ) 样本。

##### 3.1.2 初始化

初始化 PSO 算法中的参数;随机产生下层模型的初始解 (需满足约束条件);随机初始化粒子群中粒子的位置  $Y_i$  与速度  $V_i, i \in [1, m]$ ,  $m$  为群体规模 (即粒子个数,其中每个粒子表示一个可行解);将第  $i$  个粒子的  $P_i$  设置为该粒子的当前位置,  $P_g$  设置为群体中最佳粒子的位置。

##### 3.1.3 更新粒子位置与速度

在  $N$  维空间中存在位置向量和速度向量。

$$Y_i^k = (x_i^k, \dots, x_n^k, \dots, x_N^k) \quad (10)$$

$$V_i^k = (v_i^k, \dots, v_n^k, \dots, v_N^k)$$

其中,  $v_n^k \in [l_n, u_n]$ ,  $1 \leq n \leq N$ ,  $l_n$  和  $u_n$  是位置向量  $Y_i^k$  第  $n$  维座标的下限和上限;速度向量  $V_i^k$  值被限定在  $[V_{\min}^k, V_{\max}^k]$  之间。在 PSO 算法的每一次迭代过程中,整个种群的所有粒子根据以下两个公式被更新。

$$\begin{aligned} V_i^{k+1} &= \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - Y_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - Y_i^k) \\ Y_i^{k+1} &= Y_i^k + V_i^{k+1} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $P_i$  是第  $i$  个粒子自身所找到的当前位置;  $P_g$  是

整个粒子群目前找到的最优解;  $r$  和  $v$  是  $[0, 1]$  之间的随机数;  $c_1$  和  $c_2$  被称作学习因子, 通常  $c_1 = c_2 = 2$ ;  $\omega$  是加权系数, 一般取值在  $0.1 \sim 0.9$  之间。粒子群在更新过程中, 粒子速度每一维的取值不超过最大允许值, 粒子位置每一维的座标也限制在允许范围内。同时,  $P_i$  和  $P_g$  在迭代过程中不断更新, 最后输出的  $P_g$  就是算法得到的最优解。

### 3.1.4 适应度

将粒子  $i$  的位置  $Y_i$  (即上层模型的解) 代入下层模型, 利用传统非线性规划方法求解下层模型, 获得下层模型的最优解  $y_i$ , 即一组  $Q_a$  和  $Q_b$  的值。在此基础上就可计算此时的购电收益  $B$ , 可得到此个体  $S_i$  下的购电收益  $B$  的分布情况, 进而计算适应度函数中的  $CVaR(B)$  和  $E(B)$ 。

双层优化模型虽然分为上下 2 层优化问题, 有 2 个目标函数, 但是上层优化才是决策层优化, 是优化的真正目标, 所以 MP 算法的适应度函数中只包含上层优化目标函数。适应度函数定为

$$\Omega(S_i) = CVaR(B) + \varphi \Lambda(B_0 - E(B)) \quad (12)$$

其中,  $\varphi$  为足够大的正数;  $\Lambda(\cdot)$  为罚函数, 有

$$\Lambda(B_0 - E(B)) = \begin{cases} 0, & B_0 - E(B) \leq 0 \\ B_0 - E(B), & B_0 - E(B) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

罚函数保证了种群中的个体满足上层的不等式约束。适应度  $\Omega$  越小则该策略  $S_i$  越好。

### 3.1.5 更新最优解

如果粒子  $i$  的适应度优于  $P_i$  的适应度,  $P_i$  更新为该粒子的当前位置  $Y_i$ ; 对应于  $P_i$  的下层模型最优解  $y_{P_i}$  被相应更新为  $y_i^*$ 。如果粒子  $i$  的适应度优于  $P_g$  的适应度,  $P_g$  更新为该粒子的当前位置  $Y_i$ ; 对应于  $P_g$  的下层模型最优解  $y_{P_g}$  被相应更新为  $y_i^*$ 。

### 3.1.6 终止条件

判断算法收敛准则是否满足, 如果满足, 则输出双层规划模型的最优解  $P_g$  和  $y_{P_g}$ , 并相应求出上、下层规划的目标函数值, 算法运行结束。如果不满足, 对当前的  $P_g$  增加一个随机扰动, 更新  $P_g$  后, 再利用传统优化方法求出对应于  $P_g$  的下层模型的最优解  $y_{P_g}$ , 再一次更新粒子位置与速度。

## 3.2 MP 算法流程图

MP 算法流程图见图 4。

## 4.1 市场参数设置

采用 6 节点系统的拓扑结构 (如图 5 所示), 网络中有三笔直接交易 (6-3, 1-5, 1-2)。系统的线路参数见表 1。节点功率见表 2, 括号中标注了直接交易的电能。线路潮流见表 3。由于重点不在于网损计算, 则线路潮流为末端潮流。表 4 给出了各发电机对线路有功备用的贡献大小。

列出备用服务的基本报价参数, 如表 2 所示。根

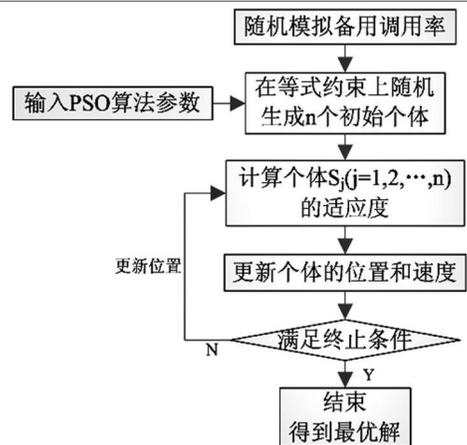


图 4 双层优化流程图

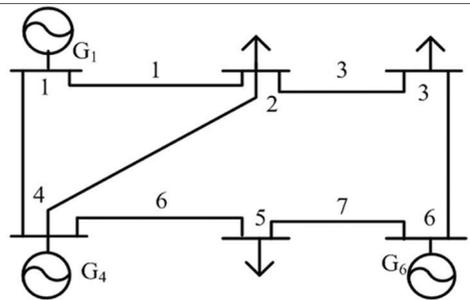


图 5 6 节点系统

表 1 线路参数

线路编号	首末端节点号	$r/p.u.$	$b/p.u.$	$x/p.u.$
1	1-2	0.07	0.01	0.36
2	1-4	0.11	0.01	0.52
3	2-3	0.02	0.02	0.12
4	2-4	0.10	0.01	0.40
5	3-6	0.07	0.00	0.30
6	4-5	0.03	0.01	0.22
7	5-6	0.27	0.02	0.34

表 2 节点功率

节点编号	发电机输出 /MW	负荷功率 /MW
1	86 (35)	0
2	0	60 (20)
3	0	45 (6)
4	40	0
5	0	34 (15)
6	18.6 (6)	0

## 4 算例分析

表 3 线路潮流

线路编号	首末端节点号	有功 /MW	潮流权数
1	1—2	59.6	18.42
2	1—4	22.7	12.89
3	2—3	26.4	16.71
4	2—4	-26.1	17.43
5	3—6	-18.1	19.18
6	4—5	34.7	15.94

表 4 发电机对线路复功率潮流的贡献

线路	G <sub>1</sub> /MW	G <sub>2</sub> /MW	G <sub>3</sub> /MW	合计
1—2	53.6	8.2	0.8	62.6
1—4	29.6	-5.6	-0.6	23.4
2—3	22.6	5.8	-1.8	26.5
2—4	-6.6	-18.7	-1.6	-26.9
3—6	-0.4	-3.7	-14.5	-18.6
4—5	20.4	17.2	-2.6	35.1
5—6	0.2	-0.2	0.7	0.7

表 5 备用电价

线路	关键线路条数	容量价格 / (元 / MW)	电量价格 / (元 / MW)
6—3	1	3.5	2.3
1—5	1	4.0	2.4
1—2	1	4.2	2.7

据关键线路情况,在基本报价中加入费用  $Q=0.06$  元/条。途经该通道的直接交易备用电价相对较高,体现了高风险性。

#### 4.2 计算结果分析

利用 MP 算法求解双层购电组合模型,当 CVaR 置信系数为 0.9 时,计算得到供电公司和直接交易备用市场上的最优购电组合结果。表 4 中除了应用双层购电模型而得到的最优购电方案(方案 1)外,还列举了其他 2 种典型的购电方案(方案 2、方案 3),与方案 1 做分析比较。

方案 1 应用了本章中所提出的双层购电模型,得到在两个备用市场的最优购电组合。

方案 2 采用传统的购电组合模型,备用作为辅助服务的一项,无偿提供,服从电网公司调度。

表 6 备用购买容量

Option	Q <sub>a</sub> /MW	Q <sub>b</sub> /MW	Q <sub>c</sub> /MW	Q <sub>d</sub> /MW
1	10	1.6	1.8	1.3
2	14	2.0	1.9	1.5
3	10	1.5	1.9	1.3

表 7 不同置信度的系统购电费用

置信度	购电费用 /万元
0.80	45.2
0.85	46.5
0.90	47.8
0.95	48.1
1.00	49.4

方案 3 在能量市场上的分配方案与方案 1 一致,

但是均以电能的 10% 采购备用容量。

由表 7 可看出,系统的购买费用随置信度水平的提高而增大。系统可选取适当的置信度水平以达到所期望的系统可靠性和经济性。

通过逐渐改变期望最小收益  $B_0$  的限制,可以在收益—风险图中画出双层购电模型的有效前沿,如图 6 所示。图 6 也显示了表 6 中不同的组合购电方案在成本—风险图中的位置,其中方案 2 的有效前沿低于方案 1 的有效前沿,而方案 3 不在有效前沿上,这就意味着在同样的风险条件下有其他更好的选择,可以提供更高的收益。当期望收益的要求较大时,为减少备用购买费用,购买量趋近于 0,方案 1、2 的有效前沿趋于一致。该  $B_0$ —CVaR 有效前沿曲线单调递增,符合市场真实情况。

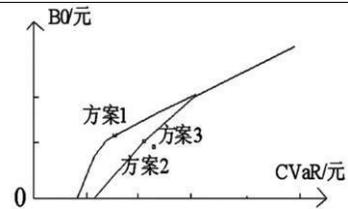


图 6 双层模型的有效前沿

## 5 结论

(1)传统备用服务交易模式已不能满足多市场、大电网环境要求,因此提出了加权网络中最优备用购买双层优化模型。

(2)通过加权网络拓扑分析,更深入地分析各交易对网络的利用程度。通过发电机的供电分配情况解析,进一步明确备用调用的风险程度,极大地扩展了备用电价的成分。

(3)采用双层最优购电模型进行计算,该模型的上层优化以在一定收益下供电公司和大用户风险最小化为目标,下层以备用购买费用最小化为目标,综合考虑了备用调用率和备用可用率的双重不确定风险。算例表明该模型为备用的市场化、备用购电决策和风险管理提供了新的工具和思路。

### 参考文献

[1] 邓东林,周杰娜,邓松. 电力市场环境下的备用服务问题[J]. 中国西部科技, 2008, 7(31): 58—59.

(下转第 56 页)

如图 3 所示。

由图 3 可知,系统能在  $160 \mu\text{s}$  左右,即 4 个周期内达到稳定状态,且输出电流和电压的超调较小,稳定后的输出电流和电压均在期望值附近。变压器初级电流连续,初级电压稳定,且两者的波动均较小。输出电流的纹波小于 10%,最大值为 203.97 A,最小值为 187.61 A,平均值约为 195.79 A;输出电压的纹波小于 5%,最大值为 58.898 V,最小值为 58.598 V,平均值约为 58.748 V。输出功率约为 11.5 kW,效率大于 95%,满足设计要求。因此,该系统在所设计参数下的响应具有良好的稳定性、快速性和准确性。

## 4 结 语

充电系统接入电网对电力系统的正常运行是有影响的,可利用其正面影响平衡日夜间的用电量,对其负面影响可采用所提到的方法加以抑制。而高频功率变压器的设计在电动汽车充电系统中是重点,更是难点,其设计是否合理,直接影响着整个系统的优劣。以 12 kW 的充电系统为例,对高频功率变压器的基本参数进行了理论上的计算,并将计算所得的参数进行 SABER 仿真。仿真结果表明,所设计变压器的各项指标均能够很好地满足充电系统的设计要求。

## 参考文献

- [1] 牛利勇. 纯电动公交充电系统关键技术研究 [D]. 北京交通大学博士论文, 2008.
- [2] 王勇. 电动汽车充电系统及其控制器的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2009.
- [3] 许陵. 开关电源变压器的设计与制作 [J]. 赣州师范学院学报 (自然科学版), 2009(3): 53-58.
- [4] 唐海燕, 李建泉. DC-DC 变换器中 25 kW 高频功率变压器的设计 [J]. 大功率变流技术, 2010(2): 26-30.
- [5] 藤乐天. 电动汽车充电机 (站) 设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] 陈新琪, 李鹏, 胡文堂, 等. 电动汽车充电站对电网谐波的影响分析 [J]. 中国电力, 2008(9): 31-36.
- [7] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 开关电源实用技术——设计与应用 (第二版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [8] Abraham I Pressman, Keith Billings, Taylor Morey. Switching Power Supply Design (Third Edition) [M]. McGraw-Hill, 2009.
- [9] 赵修科. 实用电源技术手册——磁性元器件分册 [M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [10] Colonel Wm. T. McLyman. Transformer and Inductor Design Handbook [M]. CRC Press, 2004.

(收稿日期: 2011-04-18)

(上接第 52 页)

- [2] 张夏平, 宋依群. 基于电力不足概率的互联系统备用需求研究 [J]. 广东电力, 2010, 23(3): 18-21.
- [3] 黄振伟, 杜松怀, 苏娟. 计及可中断负荷的旋转备用容量机会约束规划模型 [J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(1), 24-27.
- [4] 陈杨, 刘俊勇. 单一时段和多时段下区域旋转备用的获取 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 38-45.
- [5] 谭伦农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 54-58.
- [6] 吴集光, 刘俊勇, 牛怀平, 等. 电力市场环境最优备用容量的确定 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 10-13.
- [7] 王建学, 王锡凡, 张显, 等. 电力备用市场的竞价模型. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 7-11.

- [8] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.
- [9] 龚演平, 彭建春. 支路复功率损耗和潮流分量的归属分析 [J]. 电网技术, 2010, 34(5): 93-98.
- [10] 荆朝霞, 段献忠, 文福拴, 等. 在多种交易模式共存的电力市场中确定输电系统使用费的一种实用方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 42-47.
- [11] 彭建春, 江辉. 基于两步联盟博弈的输电网损耗分配方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 57-63.

### 作者简介:

张国芳 (1985), 女, 硕士研究生, 研究方向: 电力市场与电力系统、电力负荷特性分析。

刘俊勇 (1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统稳定与控制、电力系统可视化系统等方面的研究。

(收稿日期: 2011-02-11)