

کلیدزنی انتقال در برنامه‌ریزی یک پارچه تعمیرات انتقال و تولید در سیستم قدرت

حمید بهنیا^۱، دانشجوی دکتری؛ مهدی اخباری^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی قدرت-کنترل - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - h.behnia@shahed.ac.ir

۲- گروه مهندسی قدرت-کنترل - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - akhbari@shahed.ac.ir

چکیده: در این مقاله تأثیر کلیدزنی بهینه انتقال (TS) بر برنامه‌ریزی یک پارچه تعمیرات واحدهای نیروگاهی و خطوط انتقال (IMS) بررسی و مدل شده است. مسئله برنامه‌ریزی یک پارچه تعمیرات واحدهای نیروگاهی و خطوط انتقال با در نظر گرفتن کلیدزنی بهینه به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مختلط با عدد صحیح فرموله شده است. وجود متغیرهای فراوان برنامه‌ریزی تعمیرات با بازه زمانی‌های مختلف از یک سو و متغیر باینری کلیدزنی بهینه انتقال از سوی دیگر، حل این مسئله را با استفاده از حل‌کننده‌های متداول موجود دشوار ساخته است. در این مقاله یک روش تجزیه به منظور مدیریت بار محاسباتی مسئله برنامه‌ریزی جامع تعمیرات و کلیدزنی بهینه ارائه شده است که مسئله برنامه‌ریزی یک پارچه تعمیرات با کلیدزنی بهینه انتقال را به دو زیرمسئله برنامه‌ریزی یک پارچه تعمیرات (IMS) و کلیدزنی بهینه خطوط انتقال (TS) تجزیه می‌کند و این دو زیرمسئله را به صورت تکراری حل خواهند شد. مدل و روش تجزیه ارائه شده، بر روی سیستم تست قابلیت اطمینان IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اضافه کردن TS به IMS، برنامه تعمیرات خطوط انتقال و واحدهای نیروگاهی را تغییر می‌دهد و منجر به کاهش هزینه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تعمیرات، کلیدزنی بهینه، شبکه هوشمند، تجزیه، برنامه‌ریزی خطی با عدد صحیح.

Transmission Switching in Integrated Generation and Transmission Maintenance Scheduling in Power System

Hamid Behnia¹, Ph.D student; Mahdi Akhbari², Assistant professor

1- Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: h.behnia@shahed.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: akhbari@shahed.ac.ir

Abstract: This paper models and investigates the incorporation of optimal transmission switching (TS) into integrated generation and transmission maintenance scheduling (IMS). The IMS with TS (IMSwTS) problem is formulated as a mixed-integer linear programming model. This problem is hard to solve by off-the-shelf commercial optimization solvers since on the one hand maintenance scheduling variables couple several time intervals together and on the other hand TS variables. A solution approach is proposed in this paper to address the problem's high computational burden which decomposes the IMSwTS problem into two subproblems, an IMS subproblem and an optimal TS subproblems, and solves them iteratively. The proposed model and decomposition approach are implemented on IEEE reliability test system. The results demonstrate that adding TS to IMS alters the maintenance schedule and brings cost saving.

Keywords: transmission switching, integrated maintenance scheduling, decomposition, smart grid, mix integer linear programming.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۸، ۱۳۹۶/۱۰/۰۶ و ۱۳۹۶/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۹

نام نویسنده مسئول: مهدی اخباری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - ابتدای آزاد راه تهران، قم - دانشگاه شاهد - دانشکده فنی و مهندسی

شاخص‌ها	متغیرها
اندیس واحدهای نیروگاهی	x_l راکتانس خط انتقال l
اندیس خطوط انتقال	θ^{\min} , θ^{\max} کمینه/بیشینه زاویه فاز ولتاژ
اندیس باس‌ها	OF_{IMS}^k مقدار تابع هدف زیرمسئله تعمیرات در تکرار k ام
اندیس بازه زمانی	OF_{TS}^k مقدار تابع هدف زیرمسئله کلیدزنی در تکرار k ام
شاخص تمام واحدهای نیروگاهی	وضعیت ثابت‌شده فعلی واحد g ام در شروع بازه زمانی تعمیرات، این مقدار زمانی اگر تعمیرات واحد آغاز شده باشد ۱ و در غیراینصورت ۰ است.
شاخص نیروگاه‌هایی که به تعمیرات می‌روند (نمی‌روند)	X_{gt}
مجموعه از نیروگاه‌هایی در باس b	وضعیت ثابت شده فعلی خطوط انتقال در شروع بازه زمانی تعمیرات، این مقدار زمانی اگر تعمیرات خط آغاز شده باشد ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
مجموعه تمام خطوط انتقال	Y_{lt}
مجموعه خطوط انتقال که به تعمیرات می‌روند (نمی‌روند)	Z_{lt} وضعیت ثابت شده فعلی خطوط انتقال در زمان t (در تکرار k ام). این مقدار اگر کلید بسته باشد ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
مجموعه خطوط انتقال دارای (فاقد) قابلیت کلیدزنی	(Z_{lt}) این مقدار اگر کلید بسته باشد ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
مجموعه خطوط انتقال از باس (f) به باس (b)	ε مقدار بسیار کوچک
مجموعه فواصل زمانی در بازه برنامه‌ریزی	
مجموعه حوادث در واحدهای نیروگاهی (خطوط انتقال)	
مجموعه تمام متغیرهای مسئله IMSwTS	Ω
مجموعه تمام متغیرهای مسئله IMS	Ω_{IMS}
مجموعه تمام متغیرهای مسئله TS	Ω_{TS}
پارامترها	
مدت فاصله زمانی t	DT_t
هزینه تعمیرات واحد نیروگاهی در زمان t	H_{gt}
هزینه تعمیرات خطوط انتقال در زمان t	H_{lt}
هزینه تولید واحد نیروگاهی	P_{gt} تولید واحد g در زمان t
توان بیشینه عبوری از خط l	F_{lt} توان انتقالی در خط انتقال l در زمان t
توان خروجی بیشینه واحد g	θ_{bt} زاویه فاز ولتاژ در زمان t
بار کل سیستم در زمان t	OF_{IMS} مقدار تابع هدف زیرمسئله تعمیرات
بار در باس b و در زمان t	OF_{TS} مقدار تابع هدف زیرمسئله کلیدزنی
نرخ ذخیره سیستم	علائم اختصاری
مدت زمان تعمیرات واحد g	برنامه‌ریزی یک‌پارچه تعمیرات خط و نیروگاه
مدت زمان تعمیرات خطوط انتقال l	برنامه‌ریزی یک‌پارچه تعمیرات خط و نیروگاه با کلیدزنی خطوط انتقال
عدد ثابت بزرگ	کلیدزنی خطوط انتقال

۱- مقدمه

با ظهور و پیدایش شبکه‌های هو شمند^۱، فرصت‌های فراوانی برای استفاده بهینه از شبکه برق بوجود آمده است [۱]. خطوط انتقال در شبکه، ادوات ثابت و غیرقابل تغییری هستند، بدین معنی که وضعیت آنها به جز در مواقع تعمیرات و حوادث، تغییر نخواهد کرد. کنترل سیستم قدرت همواره متوجه محققین بوده است [۲]. و اخیراً کلیدزنی^۲ اقتصادی خطوط (TS) به عنوان یک فرصت برای انعطاف‌پذیری شبکه انتقال مطرح شده است. اگرچه TS در اقدامات اصلاحی^۳ برای مقابله با افزایش و کاهش بیش از اندازه ولتاژ و اضافه بار خطوط انتقال استفاده شده است، می‌توان با استفاده از مزایای اقتصادی آن به هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری با کنترل توپولوژی شبکه برق نیز دست یافت [۳]. با استفاده از کنترل توپولوژی و کاهش هزینه بهره‌برداری، می‌توان از کلیدزنی در مطالعات میان و بلندمدت نیز استفاده کرد [۴، ۵].

۲- کلید زنی انتقال بهینه

در گذشته از کلیدزنی به‌عنوان یک اقدام اصلاحی در برخورد با حوادث، استفاده شده است. [۶] از کلیدزنی برای کاهش اضافه‌بار و تخطی ولتاژ خطوط استفاده کرده است. از دیگر کاربردهای کلیدزنی، کاهش اضافه و مدیریت تراکم بار^۴ به جای قطع بار و استفاده از نیروگاه‌های گران قیمت است که مدل آن در [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این در [۸] از TS برای بهبود امنیت سیستم، کمینه کردن تلفات و کاهش هزینه استفاده شده است. در رویکرد جدیدتر، تحقیق [۹] با ترکیب کلیدزنی و OPF، به صرفه جویی اقتصادی دست یافته است. تابع هدف مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۵ مقاله [۹]، کاهش هزینه تولید بدون در نظر گرفتن امنیت است. [۱۰] از مدل [۹] برای مطالعه تأثیر کلیدزنی بر قیمت و بازیگران بازار برق (ژنراتورها و بارها) به همراه نگاهی به جنبه‌های

مورد نظر ارائه گردید. در [۲۳] یک مکانیزم تشویقی بر پایه هماهنگی بین اپراتور سیستم و شرکت‌های تولیدکننده انرژی در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته ارائه گردید که در آن Genco ها به دنبال حداکثر کردن سود خود و اپراتورها به دنبال حداکثر کردن قابلیت اطمینان شبکه بودند.

در [۲۴] نیز رویکردی تکراری مشابه [۲۳] بر اساس انرژی تأمین نشده در تعمیرات نیروگاه‌ها درون شبکه تجدید ساختار یافته، ارائه شده است. GMS در بازار برق به عنوان یک بازی پویای غیرمشارکتی^{۱۴} توسط ISO در [۲۵] مدل شد، لکن در [۲۶]، GMS به صورت برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل^{۱۵} برای هر Genco مدل شده است. در [۲۷] هزینه تعمیرات شرکت‌های تولیدکننده انرژی با جزئیات مطالعه و بررسی شده است.

[۲۸] تعمیرات واحدهای نیروگاهی در مسئله بلندمدت SCUC را با تجزیه بندرز و الگوریتم ناشی از آرامش^{۱۶} حل کرد. روش مشابهی برای حل تعمیرات واحدهای نیروگاهی در بازار برق نیز در [۲۹] استفاده شد. رویکرد مبتنی بر ریسک برای تعمیرات خطوط (TMS) در [۳۰] ارائه گردید. [۳۱] یک مدل دو مرحله‌ای TMS که سطح بالای آن افزایش ظرفیت انتقال و هدف سطح پایین آن تسویه بازار برای تمام بازه‌های زمانی برنامه ریزی TMS است، مطرح کرد و از آنجاکه TMS و GMS بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارد، روش برنامه‌ریزی تعمیرات یک پارچه (IMS) با در نظر گرفتن این دو معرفی گردید. مسئله IMS در [۳۲] به دو بخش شامل مسئله اصلی به تعمیرات رفتن المان‌های سیستم قدرت و زیرمسئله هزینه بهره‌برداری تجزیه شد. مدل IMS با در نظر گرفتن قیود امنیت در [۳۳] پیشنهاد گردید. همچنین هماهنگی تصادفی IMS و SCUC در [۳۴] مطالعه شده و از روش آزادسازی لاگرانژ جهت جداسازی و حل مسئله استفاده گردید.

۳-۲- برنامه ریزی تعمیرات در حضور کلیدزنی

این مقاله یک مدل برای ترکیب کلیدزنی با مسئله تعمیرات یک پارچه خط نیروگاه و روش تجزیه‌ای برای اولین بار ارائه می‌دهد. براساس مرور ادبیات، اگرچه TS اقتصادی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری [۱۰، ۱۱، ۱۳] و برنامه ریزی بلندمدت توسعه [۳، ۵] به کار گرفته شده است، اما هیچ‌گاه در مسئله IMS به کار گرفته نشده است و با ترکیب کلیدزنی بهینه خطوط و تعمیرات خطوط و واحدهای نیروگاهی، علاوه بر تغییر برنامه تعمیرات می‌توان به صرفه‌جویی اقتصادی نیز دست یافت. در واقع مقاله ارائه شده به کارگیری کلیدزنی بهینه و اقتصادی انتقال در مسئله تعمیرات خطوط انتقال و واحدهای نیروگاهی برای اولین بار است. مسئله IMS از چندین تصویر از بهره‌برداری سیستم قدرت تشکیل شده است که به وسیله متغیر تصمیم تعمیرات اجزاء سیستم قدرت، به هم مرتبط می‌شوند. به علاوه متغیر تصمیم تعمیرات و TS در پخش بار به هم ارتباط دارند، بنابراین IMSwTS یک مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مختلط در مقیاس بزرگ با حجم محاسباتی بالاست که ممکن است توسط حل‌کننده‌های تجاری در زمان معقول

محاسباتی مسئله استفاده کرده است. در [۱۰] قید امنیت خروج تک تجهیز به مدل [۹] اضافه گردید. مقاله [۱۰] در یک بازه زمانی مد نظر است که در [۱۱] با در نظر گرفتن قیود ژنراتور نظیر افزایش/کاهش نرخ تولید^{۱۷}، کمینه زمان خاموش بودن^{۱۸} و بیشینه زمان روشن بودن^{۱۹}، گسترش یافته است.

الگوریتم‌های دوسطحی مورد توجه محققین برای حل مسئله بهینه‌سازی سیستم قدرت بوده است [۱۲] که در [۱۳] مسئله با تجزیه به دو زیرمسئله شامل مشارکت واحدها با در نظر گرفتن قید امنیت^۹ و زیرمسئله کلیدزنی خطوط، حل شود. نتایج [۱۳] نشان داده است که با تغییر توپولوژی شبکه برنامه در مدار قرارگیری نیروگاه تغییر پیدا می‌کند. در این مقاله مسئله کلیدزنی در مدار قرارگیری نیروگاه همراه با قیود امنیت مدل شد. این مقاله، مسئله اصلی را با استفاده از روش تجزیه، به یک مسئله اصلی SCUC و زیرمسئله کلیدزنی تقسیم کرد. در [۳] برنامه‌ریزی توسعه خطوط و نیروگاه با استفاده از مزایای کلیدزنی بهینه فرمول‌بندی شده است و همچنین برنامه‌ریزی توسعه همراه کلیدزنی را با مدل MILP و با در نظر گرفتن ازدست رفتن المان‌های سیستم قدرت و نیز عدم قطعیت بار در [۱۴] فرموله کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که کلیدزنی در برنامه‌ریزی توسعه تغییر ایجاد می‌کند.

به منظور محاسبه قیمت حاشیه‌ای محلی^{۱۰} و تأثیر کلیدزنی بر روی آن، مدل MILP در [۱۰] ارائه شد که در حل آن، ابتدا متغیرهای باینری در مقدار بهینه خود ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در [۱۵] الگوریتم فراابتکاری حریصانه‌ای^{۱۱} برای نشان دادن حجم محاسباتی بالای کلیدزنی اصلاحی به منظور استفاده در ابزارهای بلادرنگ سیستم قدرت پیشنهاد شده است. در [۱۶] و [۱۷]، از بهینه‌سازی مقاوم و روش برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی^{۱۲} برای مقابله با عدم قطعیت بار و توان بادی با حضور کلیدزنی بهینه استفاده کرده‌اند. در [۱۸] ابزار آنالیز حوادث بلادرنگ با کلیدزنی اصلاحی پیشنهاد شده است که قیاس آن با لیست کلیدزنی اصلاحی PJM نشان داد این ابزار، صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه دارد. [۱۹] برای مواجهه با عدم قطعیت تولید باد، نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی را با کلیدزنی انتقال در مسئله مشارکت واحدها، به قید امنیت (SCUC) بیان کرد. کلیدزنی اقتصادی در سیستم قدرت با محدودیت ابزارهای کنترلی در [۲۰] مطرح شد که منجر به ارائه مدل کلیدزنی فصلی گشت. در این مدل، کلیدزنی در ابتدای هر فصل انجام می‌گیرد و تا پایان فصل توپولوژی شبکه ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۳- برنامه ریزی تعمیرات

۳-۱- برنامه ریزی یک پارچه تعمیرات

در [۲۱] محدودیت‌های شبکه در مسئله برنامه‌ریزی تعمیرات^{۱۳} (GMS) در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن قیود GMS در سیستم قدرت، طرح مدل فازی MILP [۲۲] برای کمینه کردن تخطی از طرح

در ژنراتورهایی که برای تعمیرات برنامه‌ریزی شده‌اند، متغیر باینری X_{gt} در معادله (۲)، تعیین کننده زمان شروع تعمیرات است. به همین ترتیب در معادله (۳) Y_{lt} مشخص کننده زمان شروع تعمیرات خطوط است. در معادله (۴)، متغیر باینری Z_{lt} تعیین کننده وضعیت خطوط انتقال قابل کلیدزنی است که ۰ به معنی باز بودن خط و ۱ به معنی بسته بودن آن است. قیود (۵) و (۶) در مدل، برای حصول اطمینان از به تعمیرات رفتن خطوط و واحدهای نیروگاهی در طول افق برنامه‌ریزی است.

به همین ترتیب، برای اطمینان از اتمام تعمیرات خطوط و ژنراتورها در افق برنامه‌ریزی، قیود (۷) و (۸) تعریف می‌شود. این دو قید براساس آخرین فرصت به تعمیرات رفتن خطوط و نیروگاه‌ها که برابر $|T| - MD_{g/l} + 1$ است، به دست آمده است.

$$X_{gt} = 0 \quad \forall g \in G_m, \forall t \geq (|T| - MD_g + 1) \quad (7)$$

$$Y_{lt} = 0 \quad \forall l \in L_m, \forall t \geq (|T| - MD_l + 1) \quad (8)$$

توان خروجی ژنراتورهایی که به تعمیرات نمی‌روند با متغیر مثبت تعریف شده و به مقدار بیشینه توان تولیدی واحد (\bar{P}_g) مطابق معادله (۹) محدود می‌شود.

$$0 \leq P_{gt} \leq \bar{P}_g \quad \forall g \in G_{nm}, \forall t, \quad (9)$$

یک متغیر کنترلی مثبت تعریف کننده توان خروجی ژنراتورهایی که به تعمیرات می‌روند، است. این متغیر به مانند دیگر دسته نیروگاه‌ها (نیروگاه که به تعمیرات نمی‌روند)، به مقدار بیشینه توان تولیدی خود (\bar{P}_g) محدود شده است و همچنین این متغیر تحت تأثیر وضعیت تعمیرات خود (۰ به معنی به تعمیرات رفتن و ۱ مخالف آن) است. علاوه بر این، واحدهای تولیدی که به تعمیرات می‌روند قادر به تولید توان نیستند و در بازه تعمیرات توان تولیدی آنها باید به نحوی برابر با صفر قرار داده شود. از سوی دیگر باید توجه داشت که بازه‌های زمانی که واحدهای تولیدی به تعمیرات می‌روند جزء متغیرهای تصمیم هستند و در نتیجه قبل از حل مسئله بهینه سازی مشخص نیست که واحدهای تولیدی در چه بازه‌های زمانی در تعمیرات می‌باشند. با این وجود مشخص است که نیاز است تا از متغیر تصمیم شروع تعمیرات برای اعمال این منطق که توان تولیدی واحدها در تعمیرات برابر با صفر است، استفاده نمود. فرض شود که مدت زمان تعمیرات یک واحد تولیدی (MD_g) برابر با ۳ باشد. در صورتی که تعمیرات واحد تولیدی مورد بررسی در هر یک از بازه‌های زمانی t (بازه زمانی جاری و مورد بررسی)، بازه زمانی $t-1$ (بازه زمانی قبل) و بازه زمانی $t-2$ شروع شده باشد، آنگاه واحد تولیدی مذکور در بازه زمانی مورد بررسی در تعمیرات است و در نتیجه توان تولیدی آن باید برابر با صفر قرار داده شود. می‌توان برای این منظور عبارت $(1 - \sum_{\tau=t-2}^t X_{g\tau})$ در صورتی که بازه زمانی مورد بررسی بزرگتر از ۲ باشد، عبارت

حل نشود. هر چند نوآوری اصلی این مقاله روش تجزیه نیست و نوآوری آن مدل سازی تعمیرات واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط انتقال است، با این وجود همه مسائل سیستم قدرت که کلیدزنی خطوط در آن‌ها ترکیب می‌شوند، برای حل آن‌ها در سیستم قدرت نیاز به استفاده از روش‌های تجزیه وجود دارد. روش تجزیه در مقالات [۳، ۱۱، ۱۳] به عنوان روش حل بیان شده است اگرچه نوآوری آن‌ها در مدل سازی نیز به مانند این مقاله روش تجزیه نیست، اما برای حل مسئله حجیم خود و ترکیب کلیدزنی نیازمند روش تجزیه است. از اینرو در این مقاله با توجه به تمام موارد فوق، از روش تجزیه [۱۱] برای تجزیه مسئله برنامه‌ریزی تعمیرات خطوط و واحدهای نیروگاهی به دو زیرمسئله IMS و TS استفاده شده است. به طور خلاصه می‌توان نوآوری این مقاله را استفاده از مزایای اقتصادی کلیدزنی خطوط در مسئله برنامه‌ریزی تعمیرات سیستم قدرت و استفاده از روش تجزیه در حل آن نام برد.

۳-۳- ساختار مقاله

فرمول‌بندی مسئله IMSwTS در قسمت دوم بحث خواهد شد. روش تجزیه در بخش سوم آورده می‌شود. نتایج عددی مدل پیشنهاد شده و روش تجزیه مربوط به آن، در بخش چهارم بحث خواهد شد. نتیجه‌گیری در بخش پنجم ارائه خواهد شد.

۴- مدل ریاضی مسئله IMSwTS

تابع هدف مسئله مطابق معادله (۱) تعریف می‌شود. هدف این تابع کمینه کردن هزینه سیستم در طول افق برنامه‌ریزی است که این هزینه‌ها شامل هزینه تعمیرات خط، هزینه تعمیرات نیروگاه و هزینه سوخت است.

$$\min_{\Omega} \left(\sum_{\forall g \in G_m, \forall t} H_{gt} \cdot X_{gt} + \sum_{\forall l \in L_m, \forall t} H_{lt} \cdot Y_{lt} + \sum_{\forall g, \forall t} c_g \cdot DT_t \cdot P_{gt} \right) \quad (1)$$

که در آن Ω تمام متغیرهای مسئله است.

$$\Omega = \left\{ X_{gt}, \forall g \in G_m, \forall t ; Y_{lt}, \forall l \in L_m, \forall t ; Z_{lt}, \forall l \in L_s, \forall t ; P_{gt}, \forall g, \forall t ; F_{lt}, \forall l, \forall t ; \theta_{bt}, \forall b, \forall t \right\}$$

$$X_{gt} \in \{0,1\} \quad \forall g \in G_m, \forall t \quad (2)$$

$$Y_{lt} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L_m, \forall t \quad (3)$$

$$Z_{lt} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L_s, \forall t \quad (4)$$

$$\sum_t X_{gt} = 1 \quad \forall g \in G_m \quad (5)$$

$$\sum_t Y_{lt} = 1 \quad \forall l \in L_m \quad (6)$$

معادلات (۱۴) تا (۱۷) مدل می‌شود. مقدار M مطابق [۳، ۱۰، ۱۱] برابر $(\theta^{\max} - \theta^{\min})/x_l$ است.

مشابه با واحدهای تولیدی و به صورت مشخص قید (۱۰) از اپراتور (l, t) به صورت $\max(1, t - MD_l + 1)$ تعریف شده و برای تعیین در تعمیرات بودن یا نبودن خطوط انتقال در معادلات (۱۶) و (۱۷) استفاده شده‌است.

$$\left| F_{lt} - \frac{\theta_{fr(l),t} - \theta_{to(l),t}}{x_l} \right| \leq M_l \quad \forall l \in (L_{nm} \cap L_{ns}), \forall t \quad (14)$$

$$\left| F_{lt} - \frac{\theta_{fr(l),t} - \theta_{to(l),t}}{x_l} \right| \leq M_l \cdot (1 - Z_{lt}) \quad \forall l \in (L_{nm} \cap L_s), \forall t \quad (15)$$

$$\left| F_{lt} - \frac{\theta_{fr(l),t} - \theta_{to(l),t}}{x_l} \right| \leq M_l \cdot \sum_{\tau \in \langle l, t \rangle} Y_{l\tau} \quad \forall l \in (L_m \cap L_{ns}), \forall t \quad (16)$$

$$\left| F_{lt} - \frac{\theta_{fr(l),t} - \theta_{to(l),t}}{x_l} \right| \leq M_l \cdot (1 - Z_{lt} + \sum_{\tau \in \langle l, t \rangle} Y_{l\tau}) \quad \forall l \in (L_m \cap L_s), \forall t \quad (17)$$

توان انتقالی خطوط به مقدار بیشینه توان خود محدود شده‌است (معادله (۱۸)). علاوه بر این، انتقال توان خطوط قابل کلیدزنی و خطوطی که قرار است به تعمیرات بروند، به ترتیب با معادلات (۱۹) و (۲۰) محدود می‌شوند.

$$|F_{lt}| \leq \bar{F}_l \quad \forall l, \forall t \quad (18)$$

$$|F_{lt}| \leq \bar{F}_l \cdot Z_{lt} \quad \forall l \in L_s, \forall t \quad (19)$$

$$|F_{lt}| \leq \bar{F}_l \cdot (1 - \sum_{\tau \in \langle l, t \rangle} Y_{l\tau}) \quad \forall l \in L_m, \forall t \quad (20)$$

مسئله IMSwTS با ساختاری یک پارچه و با در نظر گرفتن تأثیر TS بر روی IMS صرف نظر از اثر محدودیت‌های سیستم تجدیدساختاریافته، مدل شده است. با این حال، مدل پیشنهادی می‌تواند در سیستم‌های تجدیدساختاریافته نیز استفاده گردد.

مسئله IMSwTS یک مسئله MILP در مقیاس بزرگ است. اگرچه این مسئله را می‌توان با حل‌کننده‌های متداول تجاری موجود حل نمود اما ممکن است نیازمند حافظه گران قیمت و CPU قدرتمند باشد. از اینرو، برای کاهش بار محاسباتی روش تجزیه در قسمت بعدی مطرح می‌شود.

۵- روش تجزیه در حل مسئله IMSwTS

در این مقاله، از روش تجزیه [۱۱] برای حل IMSwTS استفاده شده است. این روش تجزیه با موفقیت در مدل در مدار قرارگیری

در صورتی که بازه زمانی مورد بررسی بزرگتر از $(1 - \sum_{\tau=t-1}^t X_{g\tau})$

باشد و عبارت $(1 - \sum_{\tau=t}^t X_{g\tau})$ در صورتی که بازه زمانی مورد بررسی برابر با ۱ باشد را در سمت راست معادله (۹) وارد نمود. برای مثال برای بازه زمانی مورد بررسی بزرگتر از ۲، در صورتی که واحد تولیدی در هر یک از بازه‌های زمانی $t-1$ یا $t-2$ به تعمیرات رفته باشد، مقدار $\sum_{\tau=t-2}^t X_{g\tau}$ برابر با ۱ و در نتیجه مقدار $1 - \sum_{\tau=t-2}^t X_{g\tau}$ برابر با صفر

است و با ضرب آن در سمت راست معادله، کران‌های پایین و بالای توان تولیدی واحد محدود به صفر شده و در نتیجه آن توان تولیدی واحد برابر با صفر می‌گردد. از سوی دیگر باید توجه داشت که برای بازه زمانی دوم برای واحد مورد بررسی، تنها نیاز است تا شروع تعمیرات در ساعات ۱ و ۲ بررسی شود و برای تعیین در تعمیرات بودن یا نبودن واحد در ساعت ۱، تنها نیاز است تا شروع تعمیرات در ساعت ۱ بررسی شود. به صورت کلی، می‌توان این مفهوم را با استفاده از اپراتور $\langle g, t \rangle$ که به صورت $\max(1, t - MD_g + 1)$ تعریف می‌شود، اعمال نمود.

$$0 \leq P_{gt} \leq (1 - \sum_{\tau \in \langle g, t \rangle} X_{g\tau}) \cdot \bar{P}_g \quad \forall g \in G_m, \forall t \quad (10)$$

معادله (۱۱) مشخص کننده محدودیت زاویه ولتاژ است.

$$\theta^{\min} \leq \theta_{bt} \leq \theta^{\max} \quad \forall b, \forall t \quad (11)$$

محدودیت میزان ذخیره تولید توان در معادله (۱۲) ذکر شده است. این معادله بیان کننده ظرفیت تولید سیستم است که باید بیشتر و یا برابر با ضریب رزرو به علاوه یک باشد. علاوه بر این، میزان ذخیره تولید توان، ممکن است به عنوان درصدی از مقدار بار برای مقابله با تغییرات بار در نظر گرفته شود.

$$\sum_{g \in G_m} (1 - \sum_{\tau \in \langle g, t \rangle} X_{g\tau}) \cdot \bar{P}_g + \sum_{g \in G_{mm}} \bar{P}_g \geq DL_t \cdot (1 + R) \quad \forall t \quad (12)$$

قید برقراری تعادل توان در سیستم قدرت امری ضروری است که در معادله (۱۳) بیان شده است. تزریق توان به باس در سمت چپ این معادله و انتقال توان از باس مذکور و به باس مذکور در سمت راست ذکر شده است.

$$\sum_{g \in G_b} P_{gt} - D_{bt} = \sum_{l \in L_b^i} F_{lt} - \sum_{l \in L_b^o} F_{lt} \quad \forall b, \forall t \quad (13)$$

خطوط انتقال از یک سو به دو دسته قابل کلیدزنی و غیر قابل کلیدزنی و از سوی دیگر به دو دسته در تعمیرات بودن یا نبودن خطوط انتقال، تقسیم می‌شود. با این تفکیک خطوط به چهار دسته تقسیم شده و ارتباط بین انتقال توان و زاویه ولتاژ در این چهار دسته خطوط، توسط

Y_{lt} جایگزین می‌شوند. علاوه بر این، قيود متغیرهای تعمیرات از مدل IMSwTS حذف می‌شود.

$$\min_{\Omega_{TS}} OF_{TS} = \left(\begin{array}{l} \sum_{\forall g \in G_m, \forall t} H_{gt} \cdot X_{gt} + \\ \sum_{\forall l \in L_m, \forall t} H_{lt} \cdot Y_{lt} + \\ \sum_{\forall g, \forall t} c_g \cdot DT_t \cdot P_{gt} \end{array} \right) \quad (26)$$

با در نظر گرفتن

$$(19) - (18), (15), (9), (4) \quad (27)$$

$$0 \leq P_{gt} \leq (1 - \sum_{\tau=\langle g,t \rangle} X_{g\tau}) \cdot \bar{P}_g \quad \forall g \in G_m, \forall t \quad (28)$$

$$\left| F_{lt} - \frac{\theta_{fr(l),t} - \theta_{to(l),t}}{x_l} \right| \leq M_l \cdot \sum_{\tau=\langle l,t \rangle} Y_{l\tau} \quad \forall l \in (L_m \cap L_{ns}), \forall t \quad (29)$$

$$\left| F_{lt} - \frac{\theta_{fr(l),t} - \theta_{to(l),t}}{x_l} \right| \leq M_l \cdot (1 - Z_{lt} + \sum_{\tau=\langle l,t \rangle} Y_{l\tau}) \quad \forall l \in (L_m \cap L_s), \forall t \quad (30)$$

$$\left| F_{lt} \right| \leq \bar{F}_l \cdot (1 - \sum_{\tau=\langle l,t \rangle} Y_{l\tau}) \quad \forall l \in L_m, \forall t \quad (31)$$

که این‌جا

$$\Omega_{TS} = \Omega \setminus \{ X_{gt}, \forall g \in G_m, \forall t; Y_{lt}, \forall l \in L_m, \forall t \}$$

باید توجه داشت که حداقل یک راه‌حل، و آن هم وضعیت فعلی کلیدها در تکرار فعلی زیرمسئله IMS وجود خواهد داشت. به‌طور مشابه حداقل یک وضعیت تعمیرات المان‌های سیستم قدرت وجود دارد و آن هم وضعیت قبل IMS در تکرار قبلی زیرمسئله TS است. اگر وضعیت کلیدها در دو تکرار متوالی تغییر نکنند، الگوریتم هم‌گرا می‌شود. در این حالت، آخرین وضعیت برنامه تعمیرات خطوط و نیروگاه، بهترین برنامه تعمیرات و آخرین وضعیت کلیدهای خطوط انتقال، بهترین برنامه برای کلیدزنی خواهد بود. چندین معیار دیگر برای هم‌گرایی و بهینگی سراسری می‌توان در نظر گرفت. اگر تابع هدف مسئله به‌آرامی تغییر کند، اجرای الگوریتم می‌تواند متوقف شود. برای این معیار مقدار کوچک 10^{-5} برای تغییر تابع هدف کلیدزنی در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم تجزیه مسئله IMSwTS به‌طور خلاصه به شرح زیر است:

- گام صفر: تمام کلیدها بسته در نظر گرفته می‌شود.
- گام ۱: حل زیرمسئله تعمیرات IMS و بدست آوردن زمان تعمیرات المانهای قدرت و ثابت‌کردن وضعیت تعمیرات این المانها

نیروگاه‌ها با کلیدزنی انتقال به کار گرفته شده است. روند روش تجزیه [۱۱] بدین صورت است که ابتدا مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها^{۱۷} حل شده و سپس با متغیر UC ثابت، مسئله حل می‌شود. نتیجه این مرحله تعیین وضعیت کلیدزنی است. این روند آن قدر ادامه می‌یابد که یا UC و TS بدون تغییر باقی بمانند و یا زمان حل مسئله از مقدار مجاز فراتر رود. در این مقاله، مسئله یک پارچه IMSwTS به دو زیرمسئله IMS و TS تجزیه می‌شود. اولین زیرمسئله، زیرمسئله IMS با معادلات (21) الی (25) است که در آن تمام متغیرهای کلیدزنی با مقادیر از پیش تعیین‌شده، ثابت در نظر گرفته می‌شود (Z_{lt}).

۵-۱- زیرمسئله IMS

$$\min_{\Omega_{IMS}} OF_{IMS} = \left(\begin{array}{l} \sum_{\forall g \in G_m, \forall t} H_{gt} \cdot X_{gt} + \\ \sum_{\forall l \in L_m, \forall t} H_{lt} \cdot Y_{lt} + \\ \sum_{\forall g, \forall t} c_g \cdot DT_t \cdot P_{gt} \end{array} \right) \quad (31)$$

با در نظر گرفتن

$$(20), (18), (16), (14) - (13), (2) \quad (32)$$

$$\left| F_{lt} - \frac{\theta_{fr(l),t} - \theta_{to(l),t}}{x_l} \right| \leq M_l \cdot (1 - Z_{lt}) \quad \forall l \in (L_{nm} \cap L_s), \forall t \quad (33)$$

$$\left| F_{lt} - \frac{\theta_{fr(l),t} - \theta_{to(l),t}}{x_l} \right| \leq M_l \cdot (1 - Z_{lt} + \sum_{\tau=\langle l,t \rangle} Y_{l\tau}) \quad \forall l \in (L_m \cap L_s), \forall t \quad (34)$$

$$\left| F_{lt} \right| \leq \bar{F}_l \cdot Z_{lt} \quad \forall l \in L_s, \forall t \quad (35)$$

که در اینجا $\Omega_{IMS} = \Omega \setminus \{ Z_{lt}, \forall l \in L_s, \forall t \}$ تمام متغیرهای یک پارچه تعمیرات است.

در تکرار اول، با اتصال تمامی خطوط، متغیر کلیدزنی یک می‌شود ($Z_{lt} = 1$).

۵-۲- زیرمسئله کلیدزنی

پس از حل مسئله IMS با ثابت فرض کردن وضعیت کلیدها، نوبت به حل زیرمسئله دوم می‌رسد. زیرمسئله دوم، زیرمسئله کلیدزنی با معادلات (26) الی (31) است. برای حل زیرمسئله دوم متغیر زمان شروع تعمیرات X_{gt} و Y_{lt} حذف و با مقدار ثابت فعلی X_{gt} و

۶-۲- تحلیل و بررسی نتایج

تعداد متغیرها و قیود مسئله IMSwTS از لحاظ تعداد متغیرهای پیوسته و باینری و هم چنین تعداد قیود در جدول ۱ نشان داده شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اطلاعات جدول ۱ بدون به کارگیری روش تجزیه به دست آمده است تا اندازه واقعی مسئله را نشان دهد. ۲۹۴۸ متغیر پیوسته با کلیدزنی و بدون کلیدزنی در این مسئله وجود دارد و برابر بودن این دو به این علت است که در حالت بدون کلیدزنی، تنها متغیر باینری در تعمیرات بودن و نبودن واحدهای نیروگاهی و خطوط انتقال در مسئله است. تعداد این متغیرها ۲۱۷ عدد است که با در نظر گرفتن کلیدزنی این تعداد به ۵۲۷ خواهد رسید. در نتیجه مهم‌ترین تفاوت بین IMS و IMSwTS در مقدار متغیرهای باینری با حضور کلیدزنی است. همانطور که اشاره شد این اتفاق به علت وجود ۱۰ خط قابل کلیدزنی (یعنی $310 = 31 \times 10$) متغیر باینری بیشتر، رخ می‌دهد. همان‌طور که اشاره شد در مسائل تعمیرات المان‌های قدرت، با توجه به حجم مسئله اغلب از روش تجزیه بهره می‌برند. علت اصلی این مورد وجود متغیر باینری تعمیرات المان‌های قدرت است که هر متغیر به صورت نمایی باعث افزایش حجم محاسباتی می‌شود. در این مقاله اضافه شدن کلیدزنی باعث افزایش ۱۴۲ درصدی (۲۱۷/۵۲۷) تعداد متغیرهای باینری خواهد شد. بنابراین افزایش قابل توجه متغیرهای باینری، موجب نیاز به کارگیری روش تجزیه می‌شود.

جدول ۱: اندازه مسائل بهینه‌سازی

با کلیدزنی خطوط	بدون کلیدزنی خطوط	تعداد متغیرهای پیوسته
۲۹۴۸	۲۹۴۸	تعداد متغیرهای پیوسته
۵۲۷	۲۱۷	تعداد متغیرهای باینری
۸۸۷۱	۸۲۲۰	تعداد قیود

زمان حل مدل‌های IMS و IMSwTS در جدول ۲ بیان شده است. همانطور که در مسائل با سیستم متوسط ۲۴ باس در [۱۱] مشاهده می‌شود، با استفاده از ابزارهای موجود حل‌کننده، ترکیب مسائل حجیم سیستم قدرت و کلیدزنی در یک ساعت حل نمی‌شود. این مورد هم در شبیه‌سازی این مقاله مطابق با جدول ۲ مشاهده می‌شود که مسئله IMSwTS در ۱ ساعت به پاسخ هم‌گرا نمی‌شود. در مدل این مقاله، برنامه تعمیرات از یک سو متغیر کلیدزنی و از سوی دیگر، فواصل زمانی را به هم متصل می‌کند. از این ویژگی می‌توان در روش تجزیه ارائه شده به منظور کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی استفاده کرد. با اینکه مسئله این مقاله بدون روش تجزیه در یک ساعت حل نمی‌شود اما با استفاده از روش تجزیه، مسئله IMSwTS در ۳۶ ثانیه حل شده و در ۴ تکرار هم‌گرا می‌شوند. زمان حل مسئله با کلیدزنی ۳۶ برابر زمان حل مسئله با در نظر گرفتن کلیدزنی است.

جدول ۲: زمان حل مسائل بهینه‌سازی

با کلیدزنی (ثانیه)	بدون کلیدزنی (ثانیه)	تجزیه
-	۱	خیر
۳۶	۱	بله

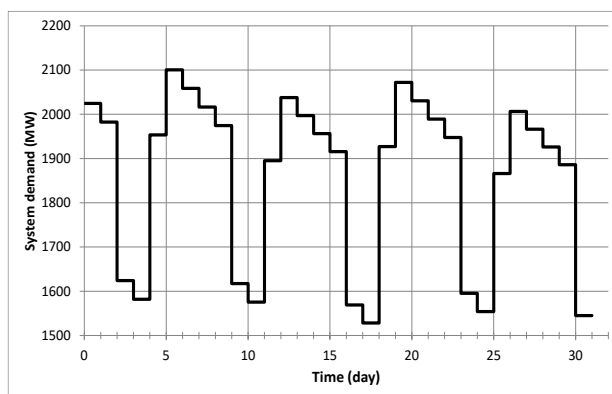
- گام ۲: حل زیرمسئله TS، بدست آوردن وضعیت کلیدها، ثابت کردن وضعیت کلیدها و ذخیره مقدار تابع هدف و وضعیت کلیدها
- گام ۳: اگر تفاوت تابع هدف مسئله کلیدزنی TS در مقایسه با تکرار قبل کمتر از مقدار کوچک 10^{-5} بود، از اجرای برنامه متوقف می‌شود و تمامی مقادیر متغیرها برگردانده می‌شود. در غیر این صورت، برنامه ادامه و شمارنده k یک واحد افزایش می‌یابد و برنامه به مرحله یک می‌رود. این معیار بدین مفهوم است که اگر تغییر مقدار تابع هدف در دو تکرار متوالی، کوچک‌تر از 10^{-5} باشد، آن‌گاه با تقریب ۰/۰۰۱ درصد می‌توان گفت که جواب به بهینه سراسری رسیده است.

۶- نتایج عددی

۶-۱- نمونه مورد مطالعه

مدل IMSwTS پیشنهادی به همراه روش تجزیه ارائه شده، در سیستم قابلیت‌اطمینان ۲۴ باس اصلاح شده (RTS) [۳۵، ۳۶] تست شد. سیستم ۲۴ باس اصلاح شده دارای ۳۲ واحد نیروگاهی و ۳۹ خط انتقال است. خطوط قابل کلیدزنی این سیستم شامل L36, L34, L32, L24, L18, L16, L15, L12, L5, L1, G30, G10, G5, G15, G20, G25 و خط L15 برای تعمیرات در نظر گرفته شده‌اند. مسئله MILP این مدل به وسیله CPLEX [۳۷] و تحت محیط مدل‌سازی GAMS حل شده است [۳۸].

هزینه تعمیرات تمام خطوط و واحدهای نیروگاهی به ترتیب ۹۶ و ۲۴ هزار دلار برای هر روز تعمیرات این المان‌ها است. افق برنامه‌ریزی تعمیرات یک ماه و دقت فواصل زمانی آن یک روز در نظر گرفته شده است. مدت زمان تعمیرات خط ۱۵ام انتقال ۳ و مدت زمان تعمیرات واحدهای نیروگاهی ۵ روز است. مسئله برای ماه مارس میلادی حل شده که بار سیستم در این ماه مطابق شکل ۱ است [۳۶]. بار در اول هفته یعنی در روزهای ۶، ۱۳، ۲۰ و ۲۷ بیشترین مقدار خود و در طول هفته به صورت پلکانی کاهش می‌یابد. برای نمونه، مطابق شکل ۱ بار بیشینه سیستم در روز ۶م برابر ۲۱۰۰ مگاوات است.



شکل ۱: بار ساعتی سیستم RTS در ماه مارس

خروج برنامه‌ریزی شده خطوط و واحدهای نیروگاهی برای هر دو مسئله IMS و IMSwTS در شکل ۳ نشان داده شده است. مهم‌ترین نکته شکل، تغییر برنامه تعمیرات با اضافه شدن کلیدزنی به مدل است. باید توجه داشت که توپولوژی شبکه با اضافه کردن کلیدزنی تغییر می‌کند و این موضوع روی محدودیت انتقال توان، پخش بار بهینه و برنامه تعمیرات تأثیر می‌گذارد.

۷- نتیجه‌گیری

این مقاله مدلی برای برنامه یک پارچه تعمیرات و کلیدزنی خطوط (IMSwTS) ارائه می‌نماید. مدل این مقاله، مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح است که برنامه‌ریزی تعمیرات و معادلات پخش بار، تمامی ساعات و متغیرهای شبکه را با یکدیگر مرتبط می‌کنند. راه‌حل تجزیه ارائه شده به منظور کاهش حجم محاسباتی، مسئله را به دو زیرمسئله تعمیرات و کلیدزنی تقسیم می‌کند. مدل ارائه شده همراه با روش تجزیه بر روی سیستم تست تغییر یافته قابلیت اطمینان ۲۴ باس IEEE مورد ارزیابی قرار گرفت. مسئله جامع IMSwTS در عرض ۱ ساعت حل نمی‌شود در حالی که با اضافه کردن روش تجزیه، این مدل در کمتر از یک دقیقه حل شد. صرفه‌جویی اقتصادی حدود ۳۵ درصد می‌باشد و مهم‌ترین دست‌آورد این تحقیق، تغییر برنامه تعمیرات با کلیدزنی است که منجر به تغییر توپولوژی شبکه می‌شود.

مراجع

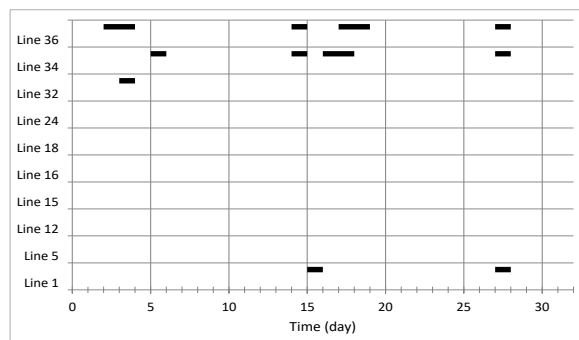
- [1] K. W. Hedman, S. S. Oren, and R. P. O. Neill, "A review of transmission switching and network topology optimization," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1-7.
- [2] حسن براتی، عباس فتاحی می‌آبادی، مهدی احسان و سید حسین حسینی، «جایابی و تنظیم پارامترهای کنترل‌گر یکپارچه عبور توان (UPFC) مدیریت پرشدگی خطوط انتقال در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار شده» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۳۹، شماره ۱، صفحات ۱۲-۱۳، ۱۳۸۸.
- [3] A. Khodaei, M. Shahidehpour, and S. Kamalinia, "Transmission Switching in Expansion Planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 1722-1733, 2010.
- [4] H. Zhang, V. Vittal, G. T. Heydt, and J. Quintero, "A Mixed-Integer Linear Programming Approach for Multi-Stage Security-Constrained Transmission Expansion Planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 1125-1133, 2012.
- [5] K. M. Schumacher, R. L.-Y. Chen, and A. E. M. Cohn, "Transmission expansion with smart switching under demand uncertainty and line failures," *Energy Systems*, pp. 1-32, 2016.
- [6] S. Wei and V. Vittal, "Corrective switching algorithm for relieving overloads and voltage violations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 1877-1885, 2005.
- [7] G. Schnyder and H. Glavitsch, "Security enhancement using an optimal switching power flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, pp. 674-681, May 1990.
- [8] G. Schnyder and H. Glavitsch, "Integrated security control using an optimal power flow and switching concepts," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, pp. 782-790, 1988.
- [9] E. B. Fisher, R. P. O'Neill, and M. C. Ferris, "Optimal Transmission Switching," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 1346-1355, Aug 2008.
- [10] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, "Optimal Transmission Switching With Contingency Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 1577-1586, Aug 2009.
- [11] K. W. Hedman, M. C. Ferris, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, "Co-Optimization of Generation Unit Commitment and

با توجه به جدول ۳، هزینه برنامه تعمیرات با و بدون کلیدزنی به ترتیب ۱۴۸۹۱ و ۲۲۹۰۹ هزار دلار است. در نتیجه با کلیدزنی صرفه‌جویی ۳۵ درصدی در هزینه‌ها رخ می‌دهد و اگر در فضای سیستم قدرت که بخش بزرگی از تأمین انرژی در کشورها را برعهده دارد در نظر گرفته شود، مقدار قابل توجه در کاهش هزینه بخش انرژی کشورها رخ می‌دهد. شاهد این نکته در مقاله [۱۱] یافت می‌شود که با فرض ۳/۷۶ درصد کاهش هزینه که با استفاده از کلیدزنی رخ داده، بیش از ۴۴ میلیون دلار کاهش هزینه در سال در بهره‌برداری سیستم تست متوسط ۹۶ باس قابلیت اطمینان IEEE وجود خواهد داشت. با توجه به این رقم، درصد کاهش هزینه تعمیرات سیستم قدرت با استفاده از کلیدزنی قابل توجه خواهد بود. باید توجه داشت که نتایج بدست آمده با سایر تحقیقات بر روی کلیدزنی [۱۱] شباهت دارد به صورتی که در این مرجع که موضوع آن مسئله کلیدزنی و پخش بار بهینه است و در نتیجه برای یک پنجره زمانی، مقدار صرفه‌جویی حدود ۳۵ درصد می‌باشد.

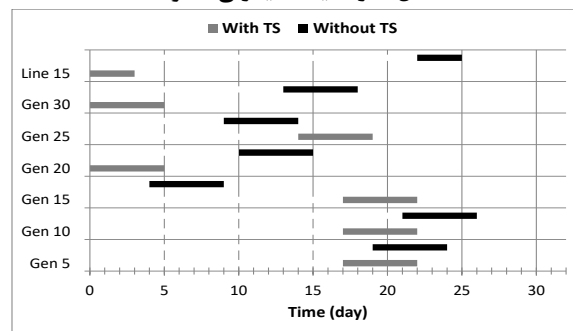
جدول ۳: صرفه‌جویی هزینه ناشی از کلیدزنی

بدون کلیدزنی (هزار دلار)	با کلیدزنی (هزار دلار)	درصد کاهش هزینه (%)
۲۲,۹۰۹.۵۴	۱۴,۸۹۱.۷۷	۳۵

وضعیت خطوط قابل کلیدزنی در شکل ۲ آورده شده است. خطوط قابل کلیدزنی ۵، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۸ و ۲۴ در تمامی روزهای موردبررسی باز می‌باشند. وضعیت خطوط ذکر شده، غیروابسته از مقدار بار و وضعیت برنامه تعمیرات است و وضعیت باقی خطوط در بازه افق برنامه‌ریزی تغییر خواهد کرد. در مقابل خطوط قابل کلیدزنی ۱، ۳۲، ۳۴ و ۳۶ در اغلب ساعات باز هستند ولی ساعاتی وجود دارد که این خطوط متصل می‌باشند.



شکل ۲: وضعیت کلیدزنی خطوط



شکل ۳: برنامه‌ریزی تعمیرات واحدهای تولیدی و خطوط با و بدون کلیدزنی انتقال

- [25] C. G. Min, M. K. Kim, J. K. Park, and Y. T. Yoon, "Game-theory-based generation maintenance scheduling in electricity markets," *Energy*, vol. 55, pp. 310 - 318, 2013.
- [26] H. Pandzic, A. J. Conejo, and I. Kuzle, "An EPEC approach to the yearly maintenance scheduling of generating units," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 922-930, 2013.
- [27] K. Dahal, K. Al-Arfaj, and K. Paudyal, "Modelling generator maintenance scheduling costs in deregulated power markets," *European Journal of Operational Research*, vol. 240, pp. 551-561, 2015.
- [28] Y. Wang, H. Zhong, Q. Xia, C. Kang, T. Wang, and X. Cao, "Coordination of generation maintenance scheduling and long-term SCUC with energy constraints and N-1 contingencies," *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 10, pp. 325-333, 2016.
- [29] Y. Wang, D. S. Kirschen, H. Zhong, Q. Xia, and C. Kang, "Coordination of Generation Maintenance Scheduling in Electricity Markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 4565-4574, November 2016.
- [30] J. Yong, J. D. McCalley, and T. Van Voorhis, "Risk-based resource optimization for transmission system maintenance," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 1191-1200, 2006.
- [31] H. Pandzic, A. J. Conejo, I. Kuzle, and E. Caro, "Yearly Maintenance Scheduling of Transmission Lines Within a Market Environment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 407-415, 2012.
- [32] M. K. C. Marwali and S. M. Shahidehpour, "Integrated generation and transmission maintenance scheduling with network constraints," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, pp. 1063-1068, 1998.
- [33] Y. Wang, H. Zhong, Q. Xia, D. S. Kirschen, and C. Kang, "An Approach for Integrated Generation and Transmission Maintenance Scheduling Considering N-1~Contingencies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PP, pp. 1-9, 2015.
- [34] Y. Wang, Z. Li, M. Shahidehpour, L. Wu, C. X. Guo, and B. Zhu, "Stochastic Co-Optimization of Midterm and Short-Term Maintenance Outage Scheduling Considering Covariates in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 4795-4805, November 2016.
- [35] P. Henneaux and D. S. Kirschen, "Probabilistic Security Analysis of Optimal Transmission Switching," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 508-517, January 2016.
- [36] C. Grigg, P. Wong, P. Albrecht, R. Allan, M. Bhavaraju, R. Billinton, et al., "The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, pp. 1010-1020, 1999.
- [37] C. D. IBM ILOG CPLEX V12.1 User's Manual for CPLEX, ILOG Inc., Incline Village, NV, USA, 2009,.
- [38] A. M. D.K. A. Brooke, and R. Raman, GAMS: A User's Guide. Washington, DC: GAMS Development Corp., 2003.
- Transmission Switching With N-1 Reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 1052-1063, 2010.
- [۱۲] سید سعید طاهری و سید جلال سیدشونا، «ارائه یک رویه دوسطحی ریاضی برای حل مسئله توسعه شبکه انتقال انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن قید توسعه تولید توان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحات ۶۰۹-۶۱۹، ۱۳۹۶.
- [13] [A. Khodaei and M. Shahidehpour, "Transmission Switching in Security-Constrained Unit Commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 1937-1945, 2010.
- [14] A. Nikoobakht, J. Aghaei, and M. Mardaneh, "Managing the risk of uncertain wind power generation in flexible power systems using information gap decision theory," *Energy*, vol. 114, pp. 846 - 861, 2016.
- [15] P. Balasubramanian and K. Hedman, "Real-Time Corrective Switching in Response to Simultaneous Contingencies," *Journal of Energy Engineering*, vol. 141, p. B4014003, 2015.
- [16] A. S. Korad and K. W. Hedman, "Robust Corrective Topology Control for System Reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 4042-4051, 2013.
- [17] Q. Feng and W. Jianhui, "Chance-Constrained Transmission Switching With Guaranteed Wind Power Utilization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 1270-1278, 2015.
- [18] P. Balasubramanian, M. Sahraei-Ardakani, X. Li, and K. W. Hedman, "Towards smart corrective switching: analysis and advancement of PJM's switching solutions," *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 10, pp. 1984-1992, 2016.
- [19] A. Nikoobakht, M. Mardaneh, J. Aghaei, V. Guerrero-Mestre, and J. Contreras, "Flexible power system operation accommodating uncertain wind power generation using transmission topology control: an improved linearised AC SCUC model," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, pp. 142-153, 2017.
- [20] M. Jabarnejad, W. Jianhui, and J. Valenzuela, "A Decomposition Approach for Solving Seasonal Transmission Switching," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 1203-1211, 2015.
- [21] E. L. da Silva, M. T. Schilling, and M. C. Rafael, "Generation maintenance scheduling considering transmission constraints," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, pp. 838-843, May 2000.
- [22] R.-C. Leou, "A flexible unit maintenance scheduling considering uncertainties," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, pp. 552-559, August 2001.
- [23] A. J. Conejo, R. Garcia-Bertrand, and M. Diaz-Salazar, "Generation maintenance scheduling in restructured power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 984-992, 2005.
- [24] H. Barot and K. Bhattacharya, "Security Coordinated Maintenance Scheduling in Deregulation Based on Genco Contribution to Unserved Energy," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 1871-1882, 2008.

زیر نویس‌ها

¹⁰ locational marginal prices

¹¹ greedy

¹² chance constrained programming

¹³ Generation maintenance scheduling

¹⁴ non-cooperative dynamic game

¹⁵ equilibrium problem with equilibrium constraint

¹⁶ relaxation induced algorithms

¹⁷ Unit commitment

¹ Smart Grid

² Transmission Switching (TS)

³ Corrective Action

⁴ Congestion Management

⁵ MILP

⁶ Ramp UP/Down

⁷ Minimum Down Time

⁸ Maximum Up Time

⁹ SCUC