# In the name of god

## Performance analysis of pumped-storage plant from condenser mode to generating process

## Ziwen Zhaoa , Diyi Chenb,⁎ , Huanhuan Lia , Haojuan Weia,b

## a Institute of Water Resources and Hydropower Research, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, PR China

## b Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Engineering Curtin University, Perth, Western Australia 6845, Australia

## تجزیه و تحلیل عملکرد نیروگاه ذخیره سازی پمپ شده از حالت کندانسور تا فرآیند تولید

## Ziwen Zhaoa ، Diyi Chenb ، ⁎ ، Huanhuan Lia ، Haojuan Weia ، b

## انستیتوی منابع آب و تحقیقات انرژی آبی ، دانشگاه Northwest A&F ، Yangling ، Shaanxi 712100 ، PR چین

## ب گروه ریاضیات و آمار ، دانشکده علوم و مهندسی Curtin University ، پرت ، استرالیای غربی 6845 ، استرالیا

## Pumped storage generating system contains twenty-four transition processes, stability performance of these transition processes determine power system quality and unit vibration. This paper focuses on the stability performance of pumped storage generation system during the transition from condenser mode to generating mode. The physical feature of condenser mode is extensively analyzed, and a mathematical model that describes the dynamic transition process of PSGS is therefore built. As two typical factors related to transition process, the switching points (27 s,30 s and 33 s) and guide vane laws (exponential type and linear type) are selected and further performed to compare stability performance of PSGS. Based on this, numerical results indicate that delayed switching point results in system oscillations and exponential law of guide vane is beneﬁt for quicker loading. This model and analysis method successfully express the transient characteristic of PSGS from condenser mode to generating mode, as well as eﬀectively predict the dynamic response of system parameters.

## سیستم تولید ذخیره سازی پمپ شده دارای بیست و چهار فرآیند گذار است ، عملکرد پایداری این فرآیندهای گذار کیفیت سیستم قدرت و ارتعاش واحد را تعیین می کند. این مقاله بر عملکرد پایداری سیستم ذخیره سازی پمپ شده در طول انتقال از حالت کندانسور به حالت تولید تمرکز می کند. ویژگی فیزیکی حالت کندانسور به طور گسترده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و بنابراین یک مدل ریاضی که روند انتقال پویا PSGS را توصیف می کند ، ساخته شده است. به عنوان دو عامل معمولی مربوط به فرایند گذار ، نقاط سوئیچینگ (27 ثانیه ، 30 ثانیه و 33 ثانیه) و قوانین پره راهنما (نوع نمایی و نوع خطی) انتخاب شده و برای مقایسه عملکرد پایداری PSGS انجام می شود. بر این اساس ، نتایج عددی نشان می دهد که تاخیر در نقطه سوئیچینگ منجر به نوسانات سیستم می شود و قانون نمایی پره راهنما برای بارگیری سریعتر مفید است. این مدل و روش تجزیه و تحلیل با موفقیت ویژگی گذرا PSGS را از حالت کندانسور به حالت تولید و همچنین به طور موثر پاسخ پویای پارامترهای سیستم را پیش بینی می کند.

## 1. Introduction

## Low-carbon energy resource in modern generation system has been fastly replacing the energy system based on fossil fuels and crude oils since China pledged to improve the contribution of renewable energy in 2015 Paris conference [1]. Among many types of renewable energy, pumped storage generation system (PSGS) is a quite suitable form in coordinated with other clean energy (e.g., wind, solar, biomass and nuclear energies, etc.) due to its merits of strengthening grid quality and suppressing system electric ﬂuctuation [2,3]. Therefore, Pumped storage generation system is regarded as the stabilizer of electric system owing to its features of ﬂexible operation and quick response [4–7]. However, these typical features of PSGS need to be tapped more suﬃcient to meet the demand of large scale renewable energy in hybrid system. In other words, pumping operation and nominal generating operation are replaced by far-ranging part load mode to meet the high demand of ﬂexible operation in recent years [8–10]. Therefore, the stability problem in transition process caused by frequent operation switching can be more remarkable in comparison with steady operation condition.

## The transition processes of PSGS refers to twenty-four switching operations (Fig. 1), therein, condenser mode to generating, as one of the typical transition process, is attracting more concerns in scholars and industrials than other transition process. This is mainly because PSGS

## ⁎ Corresponding author.

## utilizes the condenser mode to regulate voltage, balance active & reactive power, diminish unit vibrations [11,12]. In this process, high stability performance of PSGS can not only ensure the safety and quality of power system, but also bring more revenues for stakeholders. Therefore, more attentions should be paid on energy conversion mechanism and stability performance of PSGS from condenser mode to generating.

## 1. معرفی

## منابع انرژی کم کربن در سیستم های نسل جدید به سرعت جایگزین سیستم انرژی بر اساس سوخت های فسیلی و نفت خام شده است زیرا چین متعهد شد که سهم انرژی های تجدیدپذیر را در کنفرانس پاریس 2015 بهبود بخشد [1]. در میان بسیاری از انواع انرژی های تجدیدپذیر ، سیستم تولید ذخیره سازی پمپ شده (PSGS) به دلیل مزایای تقویت کیفیت شبکه و سرکوب ، یک فرم کاملا مناسب برای هماهنگی با سایر انرژی های پاک (مانند باد ، خورشید ، زیست توده و انرژی هسته ای و غیره) است. نوسانات الکتریکی سیستم [2،3]. بنابراین ، سیستم تولید ذخیره سازی پمپ به دلیل ویژگی های عملکرد قابل انعطاف و واکنش سریع به عنوان تثبیت کننده سیستم الکتریکی در نظر گرفته می شود [4-7]. با این حال ، این ویژگیهای معمولی PSGS برای پاسخگویی به تقاضای انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ در سیستم ترکیبی باید به اندازه کافی مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر ، عملیات پمپاژ و تولید اسمی با حالت بار بخشی وسیع جایگزین می شود تا تقاضای بالای عملیات قابل انعطاف در سالهای اخیر برآورده شود [8-10]. بنابراین ، مشکل پایداری در فرآیند انتقال ناشی از تغییر عملکرد مکرر می تواند در مقایسه با شرایط عملکرد ثابت قابل توجه تر باشد.

## فرایندهای انتقال PSGS به بیست و چهار عملیات سوئیچینگ اشاره دارد (شکل 1) ، در این حالت ، حالت کندانسور برای ایجاد ، به عنوان یکی از فرایندهای انتقال معمولی ، نگرانی های بیشتری را در بین محققان و صنایع نسبت به سایر مراحل انتقال به خود جلب کرده است. این عمدتا به دلیل PSGS است

## ⁎ نویسنده متناظر.

## از حالت کندانسور برای تنظیم ولتاژ ، توازن توان فعال و راکتیو ، کاهش ارتعاشات واحد استفاده می کند [11،12]. در این فرایند ، عملکرد پایدار بالای PSGS نه تنها می تواند ایمنی و کیفیت سیستم قدرت را تضمین کند ، بلکه درآمد بیشتری را برای ذینفعان به ارمغان می آورد. بنابراین ، باید توجه بیشتری به مکانیسم تبدیل انرژی و عملکرد پایداری PSGS از حالت کندانسور تا تولید شود.

## Despite several beneﬁts, some enormous challenges still exist in the transition process of the PSGS. To date, most of studies about PSGS stability have been focused on several accident operation conditions and steady operation conditions. Li et al. utilized the dynamic method to predict the ﬂow mechanism during guide vanes closing in pumping mode [13]. The signiﬁcant ﬁnding was that streamwise vortices, horseshoe-shaped vortices, and spanwise vortices lead to severe pressure ﬂuctuations. Fu et al. analyzed energy characteristics of a pumpturbine during the load rejection process [14]. This paper suggested that diﬀerent vortex structures with varying conditions resulted in diﬀerent forms of energy distribution. O. Braun and N. Ruchonnet [15] compared the pressure pulsations occurring during the pumping to generating transitions for diﬀerent times varying from 4 s to 20 s. He found that the ﬂuctuation intensity had an incline trend instead of increase with the quicker executed manoeuver. Transient characteristics during the shutdown process and the inner ﬂow behavior were studied by Li et al. [16]. The results showed the transient radial and axial forces

## با وجود چندین مزیت ، هنوز چالش های عظیمی در روند انتقال PSGS وجود دارد. تا به امروز ، بیشتر مطالعات در مورد پایداری PSGS بر چندین شرایط عملکرد تصادف و شرایط عملکرد ثابت متمرکز شده است. لی و همکاران از روش پویا برای پیش بینی مکانیسم جریان در هنگام بسته شدن پره های راهنما در حالت پمپاژ استفاده کرد [13]. نکته قابل توجه این بود که گرداب های جریان دار ، گرداب های نعل اسبی و گرداب های سمت راست منجر به نوسانات شدید فشار می شوند. فو و همکاران تجزیه و تحلیل ویژگی های انرژی یک پمپتوربین در طول فرآیند رد بار [14]. این مقاله نشان داد که ساختارهای مختلف گرداب با شرایط مختلف منجر به اشکال مختلف توزیع انرژی می شود. O. Braun و N. Ruchonnet [15] تپش های فشاری که در حین پمپاژ رخ می دهد را با ایجاد تغییرات برای زمان های مختلف از 4 ثانیه تا 20 ثانیه مقایسه کردند. او دریافت که شدت نوسان به جای افزایش مانور سریع تر ، روند مایل دارد. لی و همکاران ویژگیهای گذرا در طول فرآیند خاموش شدن و رفتار جریان داخلی را مورد مطالعه قرار دادند. [16] نتایج نشان داد که نیروهای شعاعی و محوری گذرا هستند

## exerted on the runner, which provided a preliminary estimation of possible damage during transition process. Zhang coupled the one-dimensional (1D) water conveyance system and three-dimensional (3D) pump-turbine to simulate the runaway transients [17]. The dynamic trajectories form loops in S-region was not corresponding with static characteristics. And this paper suggested that static characteristics method was beneﬁt to stability analysis while dynamic characteristics method specialized in transient parameters. In addition, researches about condenser mode, Liu et al. analyzed the decoupling characteristic between electromechanic quadrature axis subsystem and direct axis subsystem during phase modulation operation, and further studied the regulation performance of voltage [21]. The result conﬁrmed that the regulation performance of voltage was dependent on electromechannic quadrature axis subsystem. Wu et al. proposed an operation mode that using nearby pumped storage hydropower plant's synchronous condenser operation to provide voltage support to infeed ultra HVDC transmission system [19]. Zhou et al. teased out control strategy of condenser dewatering system, and analyzed the condenser operation feature through ﬁeld test [20]. Pressure signal in vaneless zone during synchronous condenser turbine to generating operation was observed by Fu [18]. The results discovered that the pressure ﬂuctuation reached the peak value at small load zone, moreover, the rotor-stator interaction frequency emerged simultaneously with blade passing frequency. Together, the previous researches put emphasis on PSGS control strategy to meet technical standard or focus on electric system stability under steady condenser mode. However, dynamic behaviour and transient stability should be obtained more investigation because the state of PSGS essentially changed from mechanical-electric system to hydromechanical-electric system. Therefore, an objective of this study is to investigate the stability in such a strong coupling system from condenser mode to generating.

## بر دونده اعمال می شود ، که برآورد اولیه آسیب احتمالی در طول فرآیند انتقال را ارائه می دهد. ژانگ سیستم انتقال آب یک بعدی (1D) و توربین پمپ سه بعدی (3D) را برای شبیه سازی گذرای فراری (17) متصل کرد. مسیرهای پویا حلقه های تشکیل شده در منطقه S با ویژگی های ایستا مطابقت نداشت. و این مقاله نشان داد که روش ویژگیهای استاتیک برای تجزیه و تحلیل پایداری مفید است در حالی که روش ویژگیهای پویا در پارامترهای گذرا تخصص دارد. علاوه بر این ، تحقیقات در مورد حالت کندانسور ، Liu و همکاران. ویژگی جداسازی بین زیر سیستم محور الکترومکانیکی محور فرعی و زیر سیستم محور مستقیم را در طول عملیات مدولاسیون فاز مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و عملکرد تنظیم ولتاژ را بیشتر مطالعه کرد [21]. نتیجه تأیید کرد که عملکرد تنظیم ولتاژ به زیرسیستم محور چهار ضلعی الکترومکانیکی وابسته است. وو و همکاران یک حالت عملیاتی را پیشنهاد کرد که با استفاده از عملیات کندانسور همزمان نیروگاه برق آبی ذخیره سازی پمپاژ شده برای ارائه ولتاژ به سیستم انتقال فوق العاده HVDC تغذیه می شود [19]. ژو و همکاران استراتژی کنترل سیستم آبگیری کندانسور را مورد آزمایش قرار داد و ویژگی عملکرد کندانسور را از طریق آزمایش میدان تحلیل کرد [20]. سیگنال فشار در منطقه بدون پره در طول توربین کندانسور همزمان برای تولید توسط Fu مشاهده شد [18]. نتایج نشان داد که نوسان فشار در محدوده بار کوچک به حداکثر مقدار خود می رسد ، علاوه بر این ، فرکانس تعامل روتور و استاتور همزمان با فرکانس عبور تیغه پدیدار می شود. با هم ، تحقیقات قبلی بر استراتژی کنترل PSGS برای مطابقت با استانداردهای فنی یا تمرکز بر پایداری سیستم الکتریکی در حالت کندانسور ثابت تأکید کردند. با این حال ، رفتار پویا و ثبات گذرا باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرد زیرا وضعیت PSGS اساساً از سیستم مکانیکی-الکتریکی به سیستم الکترومکانیکی-الکتریکی تغییر کرده است. بنابراین ، هدف این مطالعه بررسی پایداری در چنین سیستم اتصال قوی از حالت کندانسور تا تولید است.

## In light of above considerations, this paper aims at establishing a dynamic transit model of PSGS and further investigating its stability performances. Three innovations makes this paper attractive. Firstly, this paper creatively studies the dynamic stability from condenser mode to generating, which provides a new insight and enriches the knowledge of transition processes, especially for switching operation.

## با توجه به ملاحظات فوق ، این مقاله با هدف ایجاد یک مدل ترانزیت پویا از PSGS و بررسی بیشتر عملکردهای پایداری آن هدف دارد. سه نوآوری باعث جذابیت این مقاله می شود. در مرحله اول ، این مقاله به طور خلاق پایداری دینامیکی از حالت کندانسور تا تولید را مطالعه می کند ، که بینش جدیدی را ارائه می دهد و دانش فرآیندهای انتقال را ، به ویژه برای عملیات سوئیچینگ ، غنی می کند.

## Secondly, the stability performance of PSGS and guide vane laws are deeply explored to diminish risks in system. Thirdly, the relationship between eﬃciency and stability is studied under diﬀerent guide vane laws.

## The paper has been organized in the following way. In Section 2, the transient process from condenser mode to generating mode is introduced ﬁrstly, and then the PSGS model describing transient feature is built. Section 3 analyzes the system eﬀects of guide vane law and switching point. Finally, Section 4 presents the conclusions and demonstrates the future work.

## ثانیاً ، عملکرد پایداری PSGS و قوانین راهنمای پره ای عمیقاً برای کاهش خطرات در سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. ثالثاً ، رابطه بین کارآیی و ثبات تحت قوانین مختلف پره راهنمای مختلف مورد مطالعه قرار می گیرد.

## مقاله به روش زیر تنظیم شده است. در بخش 2 ، فرآیند گذرا از حالت کندانسور به حالت تولید ابتدا معرفی می شود و سپس مدل PSGS که ویژگی گذرا را توصیف می کند ، ساخته می شود. بخش 3 اثرات سیستم قانون پره راهنما و نقطه سوئیچینگ را تجزیه و تحلیل می کند. در نهایت ، بخش 4 نتیجه گیری را ارائه می دهد و کارهای آینده را نشان می دهد

## . . PSGS model from condenser mode to generating mode

## PSGS is a high nonlinear system with multi coupled subsystem including upper reservoir, downstream reservoir, penstock, pressure pipeline, generator, pump turbine (Fig. 1) [22,23]. It is diﬃcult to explore such nonlinearity due to complex interaction among these subsystems. Especially for pump turbine, as a place for transporting energy, ﬂow energy, machinery energy, electric energy and magnetic energy exist simultaneously in it. In addition, there are a lot of nonlinear switching operations in PSGS to achieve transition processes. These discontinuous changes caused by switching operation make the system behavior more diﬃcult to predict. Therefore, to perform PSGS stability from condenser mode to generating, a mathematical model suited for multi-subsystem and operation switching condition is proposed.

## . مدل PSGS از حالت کندانسور تا حالت تولید

## PSGS یک سیستم غیر خطی بالا با زیرسیستم چند زوج شامل مخزن فوقانی ، مخزن پایین دست ، بنزین ، خط لوله فشار ، ژنراتور ، توربین پمپ است (شکل 1) [شکل 22] [22،23]. کشف چنین غیر خطی به دلیل تعامل پیچیده بین این زیر سیستم ها دشوار است. به خصوص برای توربین پمپ ، به عنوان مکانی برای انتقال انرژی ، جریان انرژی ، انرژی ماشین آلات ، انرژی الکتریکی و انرژی مغناطیسی به طور همزمان در آن وجود دارد. علاوه بر این ، بسیاری از عملیات سوئیچینگ غیر خطی در PSGS برای دستیابی به فرایندهای انتقال وجود دارد. این تغییرات ناپیوسته ناشی از سوئیچینگ عملکرد ، پیش بینی رفتار سیستم را دشوارتر می کند. بنابراین ، برای انجام پایداری PSGS از حالت کندانسور تا تولید ، یک مدل ریاضی مناسب برای چند زیر سیستم و شرایط تغییر عملکرد پیشنهاد شده است.

## 2.1. Condenser mode to generating mode

## During the transition process from condenser mode to generating, pump turbine is the key subsystem with some physical variation—movement of guide vane and backwater rise. Hence this transition process could be separated into two stages—exhausting pressure and increasing load.

## Physical process from condenser mode to generating of PSGS (Fig. 2) consists two stage, exhausting pressure and increasing load), at the initial stage, impeller rotates in the air with closed guide vane [24–26]. when the command of generating is given, the rising

## 2.1 حالت کندانسور به حالت تولید

## در طول فرآیند انتقال از حالت کندانسور به تولید ، توربین پمپ زیر سیستم کلیدی با برخی تغییرات فیزیکی است - حرکت پره راهنما و افزایش آب پشتی. از این رو این فرآیند گذار را می توان به دو مرحله تقسیم کرد - فشار خسته کننده و افزایش بار.

## فرایند فیزیکی از حالت کندانسور تا تولید PSGS (شکل 2) شامل دو مرحله ، فشار خسته کننده و افزایش بار است) ، در مرحله اولیه ، پروانه در هوا با پره راهنمای بسته می چرخد ​​[24-26]. هنگامی که فرمان تولید داده می شود ، افزایش می یابد

## backwater makes a negative torque on impeller by releasing inner pressure to outside. To keep the unit rotating in a constant speed, this negative torque need to be oﬀset by absorbing power from grid. The guide vane is opened in a pre-set way after exhausting stage, and the increasing ﬂow kinetic energy acting on impeller is transported to electric energy at the meantime. In above transition process, as the switching signal for exhausting pressure stage and increasing load stage, the transient movement of guide vane aﬀects stability performance of PSGS due to two opposing forces — active force from ﬂow and negative force from backwater — acting simultaneously on the impeller. Besides, the inappropriate movements of guide vane could deteriorate stability performance during increasing load stage. Therefore, this paper explores stability inﬂuence of switching points and guide vane laws during process from condenser mode to generating mode.

## آب پشت با آزاد کردن فشار داخلی به خارج ، گشتاور منفی روی پروانه ایجاد می کند. برای چرخاندن واحد با سرعت ثابت ، این گشتاور منفی باید با جذب نیرو از شبکه تنظیم شود. پره راهنما پس از اتمام مرحله به صورت از پیش تعیین شده باز می شود و افزایش انرژی جنبشی جریان بر پروانه در همان حال به انرژی الکتریکی منتقل می شود. در فرایند گذار فوق ، به عنوان سیگنال سوئیچینگ برای مرحله فشار خسته کننده و افزایش مرحله بار ، حرکت گذرای پره راهنما به دلیل دو نیروی متضاد - نیروی فعال از جریان و نیروی منفی از آبهای پشتی - به طور همزمان بر روی پروانه ، عملکرد پایداری PSGS را تحت تأثیر قرار می دهد. . علاوه بر این ، حرکات نامناسب پره راهنما می تواند عملکرد پایداری را در مرحله افزایش بار خراب کند. بنابراین ، این مقاله به بررسی ثبات تأثیر نقاط تغییر و راهنمایی قوانین پره در طول فرآیند از حالت کندانسور به حالت تولید می پردازد.

## 2.2. Backwater Rising backwater causes a series of unstable behavior during exhausting pressure stage, such as unit vibration and grid ﬂuctuation [27,28]. To quantify this inﬂuence, backwater can be express as [29]

## 2gμa m t = 2gh hD3 [μ a − ξ0 ] + 2 v

## (1)

## where m t is the torque of pump turbine; g is the gravitational acceleration; μ a is the hydrodynamic torque coeﬃcient when the valve angle is a; ξ 0 is the resistance coeﬃcient with full opening valve; h is the head; v is the ﬂow velocity.

## 2.2 افزایش آب پشتی باعث ایجاد یک سری رفتارهای ناپایدار در مرحله فشار خسته کننده می شود ، مانند ارتعاش واحد و نوسانات شبکه [27،28]. برای کمی کردن این تأثیر ، آب پشت می تواند به صورت [29] بیان شود

## 2gμa m t = 2gh hD3 [μ a - ξ0] + 2 v

## (1)

## جایی که m t گشتاور توربین پمپ است ؛ g شتاب گرانشی است. μ a ضریب گشتاور هیدرودینامیکی زمانی است که زاویه سوپاپ a باشد. ξ 0 ضریب مقاومت با دریچه باز شدن کامل است. h سر است ؛ v سرعت جریان است.

## 2.3. Pump turbine and guide vane laws Pump turbine is the place where the kinetic energy is converted to electric energy. Generally, it can be expressed by torque (mt ) and

## discharge (q), for which are related with head h, rotation speed w and guide vane opening y. Six parameters (emy , emw , emh , eqy , e qw and eqy ) are used to express nonlinearity of transition process.

## ⎧ m t = e mw w + e my y + e mh h ⎨ ⎩ q = e qw w + e qy y + e qh h

## (3)

## where q is the discharge, noted that emy , emw , emh , eqy , e qw and e qy are the transfer coeﬃcients of torque to guide vane opening, torque to rotation speed, torque to head, discharge to guide vane opening, discharge to rotation speed and discharge to head, respectively.

## External characteristic, as an eﬀective method using six transfer coeﬃcient to study transition process, can demonstrates maximation of nonlinear character of pump turbine [30–32]. Hence, the characteristic curves of pump turbine in Fig. 3 is used to describe process from condenser to generating. Point A is the beginning of the process with dimensionless rotation speed (n ed = 1) and guide vane opening (GVO = 0). The rated operating point B has n ed = 1 and GVO = 1. The

## 2.3 توربین پمپ و قوانین پره راهنمای توربین پمپ مکانی است که انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. به طور کلی ، می توان آن را با گشتاور (mt) و بیان کرد

## تخلیه (q) ، که مربوط به سر h ، سرعت چرخش w و باز شدن پره راهنمای y است. شش پارامتر (emy ، emw ، emh ، eqy ، e qw و eqy) برای بیان غیر خطی بودن فرآیند انتقال استفاده می شود.

## ⎧ m t = e mw w + e my y + e mh h ⎨ ⎩ q = e qw w + e qy y + e qh h

## (3)

## جایی که q تخلیه است ، توجه داشته باشید که emy ، emw ، emh ، eqy ، e qw و e qy ضرایب انتقال گشتاور برای هدایت باز شدن پره ، گشتاور به سرعت چرخش ، گشتاور به سر ، تخلیه برای هدایت باز شدن پره ، تخلیه به چرخش هستند. سرعت و تخلیه به ترتیب.

## ویژگی خارجی ، به عنوان یک روش م usingثر با استفاده از شش ضریب انتقال برای مطالعه روند انتقال ، می تواند حداکثر ویژگی غیر خطی توربین پمپ را نشان دهد [30-32]. از این رو ، منحنی های مشخصه توربین پمپ در شکل 3 برای توصیف فرآیند از کندانسور تا تولید استفاده می شود. نقطه A آغاز روند با سرعت چرخش بدون بعد (n ed = 1) و باز شدن پره راهنما (GVO = 0) است. نقطه عملیاتی B دارای n ed = 1 و GVO = 1. است

## line A1B represents an ideal transition process from condenser mode to generating mode.

## Guide vane laws strongly determines transition stability of PSGS due to its direct eﬀect on ﬂow. In this paper, linear law and exponential law are introduced and its mathematical expression can be described as [33]

## 1 y= t

## (4)

## and

## y=1−e− t

## (5)

## Based on the practical operating conditions, the timespan from condenser mode to generating mode is 60 s, herein, the duration time of increasing load stage is 30 s.

## خط A1B نشان دهنده یک فرآیند انتقال ایده آل از حالت کندانسور به حالت تولید است.

## قوانین پره راهنمای ثبات انتقال PSGS را به دلیل تأثیر مستقیم آن بر جریان تعیین می کند. در این مقاله ، قانون خطی و قانون نمایی معرفی شده و بیان ریاضی آن را می توان به عنوان [33] توصیف کرد.

## 1 y = t

## (4)

## و

## y = 1 − e− t

## (5)

## بر اساس شرایط عملیاتی ، فاصله زمانی از حالت کندانسور تا حالت تولید 60 ثانیه است ، در اینجا ، مدت زمان افزایش مرحله بار 30 ثانیه است.

## 2.4. Model of pressure piping In the PSGS, the piping is longer and its layout form is more complex. To better study the nonlinear dynamic characteristic of PSGS, the pressure piping model considering hydraulic friction and elastic water hammer is introduced as [34]

## 24 96f 3 2f 24 q + + q = − ¨1 − ˙ q h r 2 h h T r 2 T r 3 hw T r hw T hw Tr 3

## (6)

## the state space form of Eq. (6) are

## ⎧ x = x 2 + b2 h ˙2 x =x3 +b1 h ⎨ ⎩ x ˙ 3 = −a 0 x 1 − a 1 x 2 + (b 0 − a 1 b2 ) h

## (7)

## and

## q=x1

## (8)

## 96f

## 24

## , b0 =− h w T r 3 24 ,

## where x1 ,x 2 and x 3 are state variables. a 0 =

## , a1 =

## 2.5. Model of synchronous motor The synchronous motor has great contribution in the process of condenser mode to generating, which absorbing or releasing of active & reactive powers from/to the power grid to satisfy the operation requirement. Hence, synchronous motor model is adopted as [16]

## ⎧ δ = ω1 ω 1 ⎨ ω ˙ = T (m t − m e − Dω) ⎩ ab

## (10)

## where δ is the angle of rotor; w is the angular speed; T ab is the time constant value of unit inertia; D is the damping coeﬃcient; ω 1 = 2πf0 where f0 is the power grid frequency as 50Hz. Taking the inﬂuence of rotation speed change on torque into generator damping, hence m e = p e , where m e is the electromagnetic torque; p e is the electro-

## E

## ′

## q

## V

## s sinδ +

## 2 V s

## x ′

## d

## ∑

## −x

## magnetic power; P e =

## x ′ d

## 2

## x ′ d

## x q

## q ∑ sin2δ where E q ′ is the tran-

## ∑

## ∑

## ∑

## sient voltage of q axis; V s is the inﬁnite bus voltage; x dΣ ′ is the transient reactance of d axis; x qΣ is the synchronous reactance.

## 3. Stability performance of PSGS

## In this section, the dynamic model of PSGS is used to assess the stability and eﬃciency during the process from condenser mode to generating mode. The simulation of this process adopts AdamsBashforth-Moulton algorithm based on the MATLAB platform. The initial values are [0.01 0.01 0.01 −0.08 0.01 0.01 0.01], ﬁxed step is 0.01.

## 3.1. Operation case classi ﬁ cations Operational performance of PSGS is associated with switching point and guide vane laws. Switching point is a typical symbol representing a transition from one operation to another operation. The following operation performance is strongly depended on the ﬁnal performance of last operation. For transition process from condenser model to generating, switching action will depend on whether PSGS increases load in a relative stable way. And improper guide vane laws for increasing load process will deteriorate ﬂow pattern in pump turbine, which further makes the eﬀect on PSGS. Herein, switching point and guide vane laws are selected study the stability of PSGS, and six cases are designed to study the inﬂuence of switching points and the guide vane laws, which are showing in Table 1.

## From Table 1, the switching points are set as 27 s, 30 s and 33 s, respectively, and the guide vane laws are linear law and exponential law. Based on the above classiﬁcations, the inﬂuence of diﬀerent switching points under two types of guide vane law ((1.1, 2.1, 3.1) and (1.2, 2.2, 3.2)) are studied ﬁrst in Section 3.2, the inﬂuence of linear law and exponential law (2.1, 2.2) is investigated in Section 3.3.

## 3.2. PSGS stability with di ﬀ erent switching points Three parameters responses (w, δ, pe ) are observed to quantify the inﬂuences of switching points on PSGS performance as they have a

## 2 T r

## 3 T r

## b 1 = − h w T r 2 12 f , b 2 = − h w T r 3 , where f is the frequency; h w is the pipe characteristic coeﬃcient; T r is the period of water hammer.

## Substitute the (5) and (7) into (8), the pressure piping model can be described as

## 1 h = −e qx ω ˙ − e qy y ˙ + x 2 + b 2 h) ( eqh

## 2.4 مدل لوله کشی تحت فشار در PSGS ، لوله کشی طولانی تر و شکل طرح آن پیچیده تر است. برای مطالعه بهتر ویژگی دینامیکی غیر خطی PSGS ، مدل لوله فشار با در نظر گرفتن اصطکاک هیدرولیکی و چکش آب الاستیک به عنوان [34] معرفی شده است.

## 24 96f 3 2f 24 q + + q = - ¨1 - ˙ q h r 2 h h T r 2 T r 3 hw T r hw T hw Tr 3

## (6)

## شکل فضای حالت معادله (6) هستند

## x = x 2 + b2 h ˙ 2 x = x3 + b1 h ⎨ ⎩ x ˙ 3 = −a 0 x 1 - a 1 x 2 + (b 0 - a 1 b2) ساعت

## (7)

## و

## q = x1

## (8)

## 96f

## 24

## ، b0 = - h w T r 3 24 ،

## جایی که x1 ، x 2 و x 3 متغیرهای حالت هستند. a 0 =

## ، a1 =

## 2.5 مدل موتور سنکرون موتور سنکرون سهم بسزایی در فرآیند حالت کندانسور در تولید دارد که نیروی فعال و واکنشی را از/به شبکه برق برای برآوردن نیاز عملیات جذب یا آزاد می کند. از این رو ، مدل موتور همزمان به عنوان [16] پذیرفته شده است.

## ⎧ δ = ω1 ω 1 ⎨ ω ˙ = T (m t - m e - Dω) ⎩ ab

## (10)

## جایی که δ زاویه روتور است ؛ w سرعت زاویه ای است ؛ T ab مقدار ثابت زمان اینرسی واحد است. D ضریب میرایی است. ω 1 = 2πf0 که f0 فرکانس شبکه برق 50 هرتز است. با در نظر گرفتن تأثیر تغییر سرعت چرخش بر گشتاور به میرایی ژنراتور ، از این رو m e = p e ، جایی که m e گشتاور الکترومغناطیسی است. p e الکترو است

## ه

## ،

## س

## V

## s sinδ +

## 2 ولت ثانیه

## ایکس '

## د

## Σ

## −x

## قدرت مغناطیسی ؛ P e =

## x ′ d

## 2

## x ′ d

## x q

## q ∑ sin2δ جایی که E q tran ترانس است

## Σ

## Σ

## Σ

## سیگنال ولتاژ محور q ؛ V s ولتاژ باس نامحدود است. x dΣ react راکتانس گذرا محور d است. x qΣ راکتانس همزمان است.

## 3. عملکرد پایدار PSGS

## در این بخش ، مدل پویای PSGS برای ارزیابی پایداری و کارآیی در طول فرایند از حالت کندانسور به حالت تولید استفاده می شود. شبیه سازی این فرایند از الگوریتم AdamsBashforth-Moulton بر اساس پلتفرم MATLAB استفاده می کند. مقادیر اولیه [0.01 0.01 0.01 10.08 0.01 0.01 0.01] ، مرحله ﬁ xed 0.01 است.

## 3.1 طبقه بندی موارد عملیات عملکرد PSGS با قوانین سوئیچ نقطه و راهنمای پره همراه است. نقطه سوئیچینگ یک نماد معمولی است که نشان دهنده گذار از یک عملیات به عملیات دیگر است. عملکرد زیر به شدت به عملکرد نهایی آخرین عملیات بستگی دارد. برای انتقال فرآیند از مدل کندانسور به تولید ، عمل تغییر به این بستگی دارد که آیا PSGS بار را به صورت پایدار نسبی افزایش می دهد یا خیر. و قوانین نادرست راهنمای پره برای افزایش روند بار ، الگوی جریان در توربین پمپ را خراب می کند ، که بیشتر بر PSGS تأثیر می گذارد. در اینجا ، قوانین سوئیچینگ و پره های راهنما برای بررسی ثبات PSGS انتخاب شده اند و شش مورد برای مطالعه تأثیر نقاط سوئیچینگ و قوانین پره راهنما ، که در جدول 1 نشان داده شده است ، طراحی شده است.

## از جدول 1 ، نقاط سوئیچینگ به ترتیب 27 ثانیه ، 30 ثانیه و 33 ثانیه تنظیم شده اند و قوانین پره راهنما قانون خطی و قانون نمایی است. بر اساس طبقه بندی های فوق ، تأثیر نقاط مختلف سوئیچینگ تحت دو نوع قانون پره راهنما ((1.1 ، 2.1 ، 3.1) و (1.2 ، 2.2 ، 3.2) ابتدا در بخش 3.2 ، تأثیر قانون خطی و نمایی مورد مطالعه قرار گرفته است. قانون (2.1 ، 2.2) در بخش 3.3 مورد بررسی قرار گرفته است.

## 3.2 ثبات PSGS با نقاط مختلف سوئیچینگ پاسخ های سه پارامتر (w ، δ ، pe) مشاهده می شود تا تأثیرات سوئیچینگ نقاط را بر عملکرد PSGS کمی کند.

## 2 T r

## 3 T r

## b 1 = - h w T r 2 12 f ، b 2 = - h w T r 3 ، جایی که f فرکانس است ؛ h w ضریب مشخصه لوله است. T r دوره چکش آب است.

## جایگزین (5) و (7) به (8) ، مدل لوله فشار را می توان به شرح زیر توصیف کرد

## 1 ساعت = −e qx ω ˙ - e qy y ˙ + x 2 + b 2 ساعت) (معادل

## 2.5. Model of synchronous motor The synchronous motor has great contribution in the process of condenser mode to generating, which absorbing or releasing of active & reactive powers from/to the power grid to satisfy the operation requirement. Hence, synchronous motor model is adopted as [16]

## ⎧ δ = ω1 ω 1 ⎨ ω ˙ = T (m t − m e − Dω) ⎩ ab

## (10)

## where δ is the angle of rotor; w is the angular speed; T ab is the time constant value of unit inertia; D is the damping coeﬃcient; ω 1 = 2πf0 where f0 is the power grid frequency as 50Hz. Taking the inﬂuence of rotation speed change on torque into generator damping, hence m e = p e , where m e is the electromagnetic torque; p e is the electro-

## E

## ′

## q

## V

## s sinδ +

## 2 V s

## x ′

## d

## ∑

## −x

## magnetic power; P e =

## x ′ d

## 2

## x ′ d

## x q

## q ∑ sin2δ where E q ′ is the tran-

## ∑

## ∑

## ∑

## sient voltage of q axis; V s is the inﬁnite bus voltage; x dΣ ′ is the transient reactance of d axis; x qΣ is the synchronous reactance.

## 2.5 مدل موتور سنکرون موتور سنکرون سهم بسزایی در فرآیند حالت کندانسور در تولید دارد که نیروی فعال و واکنشی را از/به شبکه برق برای برآوردن نیاز عملیات جذب یا آزاد می کند. از این رو ، مدل موتور همزمان به عنوان [16] پذیرفته شده است.

## ⎧ δ = ω1 ω 1 ⎨ ω ˙ = T (m t - m e - Dω) ⎩ ab

## (10)

## جایی که δ زاویه روتور است ؛ w سرعت زاویه ای است ؛ T ab مقدار ثابت زمان اینرسی واحد است. D ضریب میرایی است. ω 1 = 2πf0 که f0 فرکانس شبکه برق 50 هرتز است. با در نظر گرفتن تأثیر تغییر سرعت چرخش بر گشتاور به میرایی ژنراتور ، از این رو m e = p e ، جایی که m e گشتاور الکترومغناطیسی است. p e الکترو است

## ه

## ،

## س

## V

## s sinδ +

## 2 ولت ثانیه

## ایکس '

## د

## Σ

## −x

## قدرت مغناطیسی ؛ P e =

## x ′ d

## 2

## x ′ d

## x q

## q ∑ sin2δ جایی که E q tran ترانس است

## Σ

## Σ

## Σ

## سیگنال ولتاژ محور q ؛ V s ولتاژ باس نامحدود است. x dΣ react راکتانس گذرا محور d است. x qΣ راکتانس همزمان است.

## 3.1. Operation case classi ﬁ cations Operational performance of PSGS is associated with switching point and guide vane laws. Switching point is a typical symbol representing a transition from one operation to another operation. The following operation performance is strongly depended on the ﬁnal performance of last operation. For transition process from condenser model to generating, switching action will depend on whether PSGS increases load in a relative stable way. And improper guide vane laws for increasing load process will deteriorate ﬂow pattern in pump turbine, which further makes the eﬀect on PSGS. Herein, switching point and guide vane laws are selected study the stability of PSGS, and six cases are designed to study the inﬂuence of switching points and the guide vane laws, which are showing in Table 1.

## From Table 1, the switching points are set as 27 s, 30 s and 33 s, respectively, and the guide vane laws are linear law and exponential law. Based on the above classiﬁcations, the inﬂuence of diﬀerent switching points under two types of guide vane law ((1.1, 2.1, 3.1) and (1.2, 2.2, 3.2)) are studied ﬁrst in Section 3.2, the inﬂuence of linear law and exponential law (2.1, 2.2) is investigated in Section 3.3.

## 3.2. PSGS stability with di ﬀ erent switching points Three parameters responses (w, δ, pe ) are observed to quantify the inﬂuences of switching points on PSGS performance as they have a

## 3.1 طبقه بندی موارد عملیات عملکرد PSGS با قوانین سوئیچ نقطه و راهنمای پره همراه است. نقطه سوئیچینگ یک نماد معمولی است که نشان دهنده گذار از یک عملیات به عملیات دیگر است. عملکرد زیر به شدت به عملکرد نهایی آخرین عملیات بستگی دارد. برای انتقال فرآیند از مدل کندانسور به تولید ، عمل تغییر به این بستگی دارد که آیا PSGS بار را به صورت پایدار نسبی افزایش می دهد یا خیر. و قوانین نادرست راهنمای پره برای افزایش روند بار ، الگوی جریان در توربین پمپ را خراب می کند ، که بیشتر بر PSGS تأثیر می گذارد. در اینجا ، قوانین سوئیچینگ و پره های راهنما برای بررسی ثبات PSGS انتخاب شده اند و شش مورد برای مطالعه تأثیر نقاط سوئیچینگ و قوانین پره راهنما ، که در جدول 1 نشان داده شده است ، طراحی شده است.

## از جدول 1 ، نقاط سوئیچینگ به ترتیب 27 ثانیه ، 30 ثانیه و 33 ثانیه تنظیم شده اند و قوانین پره راهنما قانون خطی و قانون نمایی است. بر اساس طبقه بندی های فوق ، تأثیر نقاط مختلف سوئیچینگ تحت دو نوع قانون پره راهنما ((1.1 ، 2.1 ، 3.1) و (1.2 ، 2.2 ، 3.2) ابتدا در بخش 3.2 ، تأثیر قانون خطی و نمایی مورد مطالعه قرار گرفته است. قانون (2.1 ، 2.2) در بخش 3.3 مورد بررسی قرار گرفته است.

## 3.2 ثبات PSGS با نقاط مختلف سوئیچینگ پاسخ های سه پارامتر (w ، δ ، pe) مشاهده می شود تا تأثیرات سوئیچینگ نقاط را بر عملکرد PSGS کمی کند.

## strong coupled relationship. As typical performance indicator, unstable rotation speed caused by turbulent ﬂow will lead a ﬂuctuation of power angle (δ) and power (pe ), PSGS stability will suﬀer when balancing the active power and reactive power. Based on this, cases (1.1, 2.1, 3.1) are selected to compare the inﬂuence of switching points, and the dynamic responses of rotation speed w, power angleδ, power p e are showed in Fig.5

## رابطه قوی قوی به عنوان شاخص عملکرد معمولی ، سرعت چرخش ناپایدار ناشی از جریان متلاطم منجر به افزایش زاویه توان (δ) و توان (pe) می شود ، ثبات PSGS در هنگام ایجاد توازن بین قدرت فعال و توان راکتیو ، تضمین می کند. بر این اساس ، موارد (1.1 ، 2.1 ، 3.1) برای مقایسه تأثیر نقاط سوئیچینگ انتخاب شده و پاسخهای دینامیکی سرعت چرخش w ، زاویه توانδ ، قدرت p e در شکل 5 نشان داده شده است.

## In these cases, there are apparent saltation (Fig.5 (a–c) at the switching points of t = 27 s t = 30 s t = 33 s showing the transition from condenser mode to generating. For each parameter responses, they have the same responses before operation switching. Similarly, the general trends are the same after switching points. However, there still are some diﬀerences caused by various switching points. From Fig.5(a), the ﬂuctuation of rotation speed (w) becomes gradually less, and then occurs the sharply oscillation at switching points, convergence to zero at the end. What is striking is that the delayed switching point, the more clearly ﬂuctuation in the second stage. The power angle (δ) ﬁrstly decreases and then steeply increases with the guide vane opens. Furthermore, the early switching point produces higher value of subsequent power angle (δ). In unstable region, the delayed switching point can result in bigger vibration. In Fig.5(c), the response of power (pe ) is similar with power (δ). In the ﬁrst stage, the unit absorbs active power from power grid as the raising backwater. During the second stage, the resisting torque stemmed from backwater are oﬀset, and then the unit releases the active power to power grid with the guide vane opens. Besides, the delayed switching point leads to bigger ﬂuctuation and smaller power (pe ) value at the end.

## Cases (1.2, 2.2, 3.2) are chosen to study the inﬂuence of switching point under the exponential law of guide vane. The response of three parameters (w, δ, pe ) are shown in Fig.6.

## From Fig.6, steep change occurs in three parameters (w, δ, pe ) at the switching points. Speciﬁcally, the ﬂuctuation amplitudes in Fig.6(a)

## در این موارد ، نمک ظاهری وجود دارد (شکل 5 (a -c) در نقاط سوئیچینگ t = 27 st = 30 st = 33 s که انتقال از حالت کندانسور به حالت تولید را نشان می دهد. برای هر پاسخ پارامتر ، آنها یکسان هستند به طور مشابه ، روندهای کلی پس از تغییر نقاط یکسان است. با این حال ، هنوز تفاوتهایی وجود دارد که توسط نقاط مختلف سوئیچینگ ایجاد می شود. از شکل 5 (الف) ، تغییرات سرعت چرخش (w) به تدریج کمتر می شود ، و سپس نوسان شدید در نقاط سوئیچینگ اتفاق می افتد ، در انتها به صفر می رسد. آنچه قابل توجه است این است که نقطه تعویق تاخیری ، در مرحله دوم نوسان بیشتری دارد. زاویه توان (δ) ابتدا کاهش می یابد و سپس با شیب شدید افزایش می یابد پره راهنما باز می شود. علاوه بر این ، نقطه کلید اولیه مقدار بیشتری از زاویه توان بعدی (δ) را تولید می کند. در منطقه ناپایدار ، نقطه سوئیچینگ با تاخیر می تواند باعث ارتعاش بیشتر شود. در شکل 5 (ج) ، پاسخ توان (pe) با قدرت مشابه است ( δ) در مرحله اول ، واحد قدرت فعال را از شبکه برق به عنوان افزایش آب برگشتی جذب می کند. در مرحله دوم ، گشتاور مقاومتی ناشی از آبهای پشتی تنظیم می شود و سپس واحد با باز شدن پره راهنما ، قدرت فعال را به شبکه برق آزاد می کند. علاوه بر این ، نقطه تعویض تاخیری منجر به نوسان بیشتر و مقدار قدرت کمتر (pe) در پایان می شود.

## موارد (1.2 ، 2.2 ، 3.2) برای مطالعه تأثیر نقطه سوئیچینگ تحت قانون نمایی پره راهنما انتخاب شده اند. پاسخ سه پارامتر (w ، δ ، pe) در شکل 6 نشان داده شده است.

## از شکل 6 ، تغییرات شدید در سه پارامتر (w ، δ ، pe) در نقاط سوئیچینگ رخ می دهد. به طور خاص ، دامنه های نوسان در شکل 6 (a)

## 3.3. PSGS stability with di ﬀ erent guide vane laws

## The guide vane law play an important role in the dynamic characteristics of PSGS. Fig. 7 shows the responses of three parameters (w, δ, pe ) under six operation cases during the process from condenser mode to generating mode. Both linear law and exponential law of guide vane share a common response in the ﬁrst stage, while the signiﬁcant differences occurs in the second stage. Simultaneously, the ﬂuctuation of rotation speed (w) for exponential law is more apparent than of linear law. With respect to the response of power angle (δ) and power (pe ), the exponential law achieves a marked rise within a short period after switching points compared with the performance in linear law. Parameters (δ,pe ) have the maximal values in linear law than that in exponential law at the end of the transient process.

## To better compare the inﬂuence of diﬀerent guide vane laws, cases (2.1, 2.2) with 30 s switching points are selected to further compare the stability properties between linear law and exponential law, as shown in Fig.7.

## For rotation speed (w) in Fig.8(a), the maximum value under exponential guide vane law is doubled than that of linear guide vane law. Fig.8(b) shows a transition trajectory with discharge (x-axis) and

## 3.3 ثبات PSGS با قوانین مختلف راهنمای پره

## قانون پره راهنما نقش مهمی در ویژگی های پویای PSGS ایفا می کند. شکل 7 پاسخ های سه پارامتر (w ، δ ، pe) را در شش مورد عملیات در طول فرآیند از حالت کندانسور به حالت تولید نشان می دهد. هر دو قانون خطی و قانون نمایی پره راهنما در مرحله اول پاسخ مشترکی دارند ، در حالی که تفاوتهای قابل توجهی در مرحله دوم رخ می دهد. به طور همزمان ، نوسان سرعت چرخش (w) برای قانون نمایی بیشتر از قانون خطی آشکار است. با توجه به پاسخ زاویه قدرت (δ) و توان (pe) ، قانون نمایی در مدت کوتاهی پس از تغییر نقاط در مقایسه با عملکرد در قانون خطی ، به یک افزایش قابل توجه می رسد. پارامترها (δ ، pe) بیشترین مقدار را در قانون خطی نسبت به قانون نمایی در انتهای فرایند گذرا دارند.

## برای مقایسه بهتر تأثیر قوانین مختلف پره راهنما ، موارد (2.1 ، 2.2) با 30 نقطه تغییر جهت افزایش مقایسه خواص پایداری بین قانون خطی و قانون نمایی ، همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است ، انتخاب می شوند.

## برای سرعت چرخش (w) در شکل 8 (a) ، حداکثر مقدار تحت قانون پره راهنمای نمایی دو برابر قانون پره راهنمای خطی است. شکل 8 (ب) یک مسیر انتقال با تخلیه (محور x) و نشان می دهد

## rotation speed (y-axis), the linear law lead to a relative small ﬂuctuation and quick converge to zero. From the view of eﬃciency, the exponential law takes 88.3% load while the linear law takes 35.4% load at time t = 43 s. Power angle (δ) for exponential law reaches the peak point (1.1929) within 7 s and then falls to the value of 0.7 gradually while the change of δ for linear law ﬁrst increases and then decreases to

## 0.87. This dynamic behaviour depends on guide vane laws because the power load cannot compensate the sharply rising ﬂow kinetic energy due to quick opening of guide vane for exponential law in the early 7 s. Fig.8(d) reveals that power lines of these two laws increase in diﬀerent rates intersect at t = 55 s. Noted that the linear law produces a higher ﬁnal power output (21.97) although the linear law has a higher increase rate in the early stage. Additionally, the exponential law accounts for 80% load within a short period of (30, 39.3), but the ﬂuctuation range in unstable region indicates that such a quick loading feature needs the sacriﬁce of system stability.

## سرعت چرخش (محور y) ، قانون خطی منجر به یک نوسان نسبی کوچک می شود و سریع به صفر می رسد. از نظر کارآیی ، قانون نمایی 88.3 load بار را می گیرد در حالی که قانون خطی 35.4 load بار را در زمان t = 43 ثانیه می گیرد. زاویه توان (δ) برای قانون نمایی در عرض 7 ثانیه به نقطه اوج (1.1929) می رسد و سپس به تدریج به مقدار 0.7 کاهش می یابد در حالی که تغییر δ برای قانون خطی ابتدا افزایش می یابد و سپس کاهش می یابد.

## 0.87 این رفتار پویا به قوانین پره های راهنما بستگی دارد زیرا بار نیرو نمی تواند انرژی جنبشی افزایش شدید جریان را به دلیل باز شدن سریع پره راهنمای قانون نمایی در اوایل 7 ثانیه جبران کند. شکل 8 (د) نشان می دهد که خطوط برق این دو قانون در نرخ های متفاوتی افزایش می یابد و در 55 ثانیه t = قطع می شوند. اشاره شد که قانون خطی خروجی نهایی نهایی بالاتری را تولید می کند (21.97) اگرچه قانون خطی در مراحل اولیه دارای نرخ افزایش بالاتری است. علاوه بر این ، قانون نمایی 80 درصد بار را در مدت کوتاهی (30 ، 39.3) محاسبه می کند ، اما محدوده نوسان در منطقه ناپایدار نشان می دهد که چنین ویژگی بارگذاری سریع نیاز به فداکاری ثبات سیستم دارد.

## Based on above analysis, the eﬀect of switching points can be explained from two aspects. First, the delayed switching point causing large ﬂuctuation of rotation speed (w) deteriorate the system stability during the increasing load stage. Second, delayed switching point also generates the decreasing output power due to the decreasing eﬃciency of PSGS. Diﬀerent guide vane laws are also related with PSGS stability. First, the PSGS with exponential law results in large ﬂuctuations. Second, the exponential law is beneﬁt to quick loading, but the ﬁnal power (pe ) is less than the value of linear law. Third, exponential law produces a large system vibration in unstable region compared with the linear law. In addition, statistical data are extracted to further explain the stability and eﬃciency of PSGS, as listed in Table 2.

## From Table 2, the maximal ﬂuctuation of rotation speed (w) is

## 0.0174, appearing in case 3.1. For power angle (δ), the linear law produces a maximal value (0.9655, 0.8740, 0.7817) in the whole transient process, while all maximal values (1.4354, 1.1929, 1.0011) under exponential law are higher than the corresponding ﬁnal values (0.7792, 0.7016, 0.6204). The diﬀerence value (0.6562) between maximal value (1.4354) and ﬁnal value (0.7792) occurs in case 1.2. Considering the stability of power (pe ), the smallest vibration (0.3460) appears in case 1.1, followed by the second smaller vibration (0.3673) in case 1.2 that brings 80% of load within 7.2 s. This response is conductive to eﬃciency of PSGS.

## بر اساس تجزیه و تحلیل فوق ، تأثیر نقاط تغییر را می توان از دو جنبه توضیح داد. اول ، نقطه تعویض تاخیری که باعث افزایش زیاد سرعت چرخش (w) می شود ، پایداری سیستم را در مرحله بارگذاری افزایش می دهد. دوم ، تأخیر در سوئیچینگ نیز به دلیل کاهش کارآیی PSGS ، قدرت خروجی را کاهش می دهد. قوانین مختلف راهنمای مختلف نیز با ثبات PSGS مرتبط هستند. اول ، PSGS با قانون نمایی منجر به نوسانات زیادی می شود. دوم ، قانون نمایی برای بارگذاری سریع مفید است ، اما قدرت نهایی (pe) کمتر از مقدار قانون خطی است. سوم ، قانون نمایی در مقایسه با قانون خطی ارتعاش سیستم زیادی را در منطقه ناپایدار ایجاد می کند. علاوه بر این ، داده های آماری برای توضیح بیشتر ثبات و کارآیی PSGS ، که در جدول 2 ذکر شده است ، استخراج می شود.

## از جدول 2 ، حداکثر نوسان سرعت چرخش (w) است

## 0.0174 ، ظاهر شده در مورد 3.1. برای زاویه توان (δ) ، قانون خطی حداکثر مقدار (0.9655 ، 0.8740 ، 0.7817) را در کل فرآیند گذرا تولید می کند ، در حالی که همه مقادیر حداکثر (1.4354 ، 1.1929 ، 1.0011) تحت قانون نمایی بیشتر از مقادیر نهایی مربوطه (0.7792 ، 0.7016 ، 0.6204). مقدار تفاوت (0.6562) بین حداکثر مقدار (1.4354) و مقدار نهایی (0.7792) در مورد 1.2 رخ می دهد. با توجه به ثبات قدرت (pe) ، کوچکترین ارتعاش (0.3460) در مورد 1.1 ظاهر می شود ، و پس از آن دومین ارتعاش کوچکتر (0.3673) در مورد 1.2 که 80٪ بار را در 7.2 ثانیه به ارمغان می آورد. این پاسخ برای کارآیی PSGS مثر است.

## ) The switching point leads to great inﬂuence on PSGS. The delayed switching point brings system larger ﬂuctuation, which mainly expressed by parameters (w and pe ). Interestingly, this ﬁnding is not corresponding with actual engineering experience that it is beneﬁcial for turning to next operation stage until the prior operation stage shows the relative slight vibration.

## 2) It is diﬃcult to maintain PSGS stability and eﬃciency simultaneously. Specially, for exponential law, it brings 80 percentage of load within 9.3 s whereas the linear law needs 24.8 s, but this feature of quick loading is at cost of stability, and the ﬁnal value of power (pe ) is lower than that of linear law.

## ) نقطه تغییر منجر به تأثیر زیادی بر PSGS می شود. نقطه تعویض تاخیری باعث افزایش بیشتر سیستم می شود که عمدتا توسط پارامترهای (w و pe) بیان می شود. جالب است که این یافته با تجربیات واقعی مهندسی مطابقت ندارد ، زیرا برای بازگشت به مرحله بعدی عملیات تا زمانی که مرحله عملیات قبلی ارتعاش نسبی جزئی را نشان ندهد ، مفید است.

## 2) حفظ ثبات و کارآیی PSGS به طور همزمان مشکل است. به طور خاص ، برای قانون نمایی ، 80 درصد بار را در 9.3 ثانیه به ارمغان می آورد در حالی که قانون خطی به 24.8 ثانیه نیاز دارد ، اما این ویژگی بارگذاری سریع به قیمت ثبات است و ارزش نهایی قدرت (pe) کمتر از آن است. قانون

## The essence of PSGS from condenser mode to generating is synergy operation of hydro-mechanic-electric multi-subsystem and the purpose of condenser operation is to maintain quality of power grid by balancing the active power and reactive power. However, this paper emphasized the hydro-mechanic dynamic response of PSGS without considering disturbance from electrical load ﬂuctuation. Therefore, the load model will be introduced to existing PSGS model, and this detailed model will be used to study PSGS stability from condenser mode to generating.

## ماهیت PSGS از حالت کندانسور تا تولید ، عملکرد هم افزایی چند زیرسیستم هیدرو مکانیکی-الکتریکی است و هدف از عملکرد کندانسور حفظ کیفیت شبکه برق با ایجاد توازن بین قدرت فعال و توان راکتیو است. با این حال ، این مقاله بر پاسخ دینامیکی هیدرو مکانیکی PSGS بدون در نظر گرفتن اختلال در نوسانات بار الکتریکی تأکید کرد. بنابراین ، مدل بار به مدل PSGS موجود معرفی می شود و این مدل دقیق برای مطالعه پایداری PSGS از حالت کندانسور تا تولید مورد استفاده قرار می گیرد.

## CRediT authorship contribution statement

## Ziwen Zhao: Conceptualization, Methodology, Software, Investigation, Writing - original draft. Diyi Chen: Writing - review & editing. Huanhuan Li: Resources, Writing - review & editing, Supervision. Haojuan Wei: Resources, Writing - review & editing, Supervision.

## Declaration of Competing Interest

## The authors declare that they have no known competing ﬁnancial interests or personal relationships that could have appeared to inﬂuence the work reported in this paper.

## Acknowledgements

## This work was supported by the scientiﬁc research foundation of National Natural Science Foundation of China – Outstanding Youth Foundation (No. 51622906), National Natural Science Foundation of China (No. 51479173), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 201304030577), Scientiﬁc research funds of Northwest A&F University (No. 2013BSJJ095), Science Fund for Excellent Young Scholars from Northwest A&F University and Shaanxi Nova program (No. 2016KJXX-55

## بیانیه مشارکت نویسندگی CRediT

## Ziwen Zhao: مفهوم سازی ، روش شناسی ، نرم افزار ، تحقیق ، نگارش - پیش نویس اصلی. دیی چن: نوشتن - مرور و ویرایش. Huanhuan Li: منابع ، نگارش - مرور و ویرایش ، نظارت. Haojuan Wei: منابع ، نگارش - مرور و ویرایش ، نظارت.

## اعلام علاقه رقابت

## نویسندگان اعلام می کنند که هیچ منافع مالی یا روابط شخصی شناخته شده ای ندارند که بتواند بر آثار گزارش شده در این مقاله تأثیر بگذارد.

## سپاسگزاریها

## این کار توسط بنیاد تحقیقات علمی بنیاد ملی علوم طبیعی چین - بنیاد جوانان برجسته (شماره 51622906) ، بنیاد ملی علوم طبیعی چین (شماره 51479173) ، صندوق های تحقیقاتی بنیادی برای دانشگاههای مرکزی (شماره 201304030577) پشتیبانی می شود. ، بودجه تحقیقاتی دانشگاه Northwest A&F University (شماره 2013BSJJ095) ، صندوق علمی برای دانش پژوهان جوان عالی از دانشگاه A&F Northwest و برنامه Shaanxi Nova (شماره 2016 KJXX-55