

تعدیل اثر ضریب توان ژنراتور در نتایج آزمون عملکرد یک واحد نیروگاهی

منصور قربانزاده

رضا دانش‌آموز

دفتر فنی نظارت بر تولید، شرکت برق منطقه‌ای خراسان

چکیده

در این مقاله، اثر ضریب توان ژنراتور در نتایج آزمون عملکرد یک واحد نیروگاهی مورد تعدیل قرار گرفته است. آزمون عملکرد، آزمونی است که در آن، واحد مطابق با استانداردهای مربوطه، در بار حداکثر مورد بهره‌برداری قرار گرفته تا توانایی آن در احراز ظرفیت و نرخ حرارتی مطلوب و مطابق با مدارک سازنده، مورد سنجش قرار گیرد. جهت سنجش صحیح، هر گونه انحراف شرایط تست از شرایط مرجع، به وسیله منحنی‌های اصلاحی مورد بازبینی قرار می‌گیرد. یکی از این شرایط مرجع، ضریب توان ژنراتور است که از یک سو به دلیل محدودیت‌های بهره‌برداری در شبکه قدرت، عمدتاً امکان تأمین آن در حین تست برای واحد وجود نداشته و از سوی دیگر برخلاف سایر شرایط مرجع، منحنی اصلاحی‌ای توسط سازنده واحد برای آن ارائه نمی‌شود. در این مقاله، روشی محاسباتی جهت تعدیل اثر ضریب توان ژنراتور در نتایج آزمون عملکرد ارائه شده و سپس این روش برای تصحیح نتایج آزمون یک واحد گازی V94.2 که دارای قرارداد خرید تضمینی برق می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بررسی‌ها نشان داد تعدیل ضریب توان، اثر قابل توجهی در نتایج آزمون داشته و لذا بایستی در نتایج آزمون لحاظ گردد. شایان ذکر است این رویه اصلاحی، برای هر نوع واحد نیروگاهی قابل استفاده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آزمون عملکرد، تلفات الکتریکی، ضریب توان، قرارداد خرید تضمینی برق، مصرف داخلی

۱- مقدمه

عادی^۱، توان تضمینی مطابق با مدارک سازنده را در نقطه قراردادی تحویل توان، با راندمان تعیین شده، تأمین نماید یا خیر. آزمون عملکرد یکی از ضروریات قراردادهای خرید و احداث نیروگاه است. همچنین مالکان و بهره‌برداران نیروگاه‌ها به دلیل مسائل مربوط به بازار برق، علاقه‌مند به انجام آزمون عملکرد در دوره‌های مختلف زمانی می‌باشند. دیگر کاربرد مهم آزمون عملکرد را می‌توان در قراردادهای خرید تضمینی برق، عنوان نمود.

با اعطای مجوز احداث نیروگاه به بخش خصوصی در راستای اصل ۴۴ قانون اساسی، نوعی از قراردادهای خرید برق موسوم

آزمون عملکرد^۱، آزمایشی است که در آن توربین ژنراتور در حالت دائمی^۲ خود، به تولید توان پایه (حداکثر) در مدت زمان مشخص شده در تست، طبق استاندارد ISO 2314 می‌پردازد. هدف از انجام آزمون عملکرد، مشخص شدن این مطلب است که آیا واحد نیروگاهی مورد نظر می‌تواند با احتساب کلیه مصارف داخلی خود و تلفات کلیه تجهیزات، در حالت ایمن و

3 Safe & Normal

1 Performance Test

2 Steady State

تست بهره‌برداری می‌شوند. از این رو باید با روشی، اثر ضریب توان واحد در شرایط اجرای تست، تعدیل گردد تا نتایجی معتبر برای تست حاصل شود.

در این مقاله، بر مبنای یک روش محاسباتی، اثر ضریب توان ژنراتور در نتایج آزمون عملکرد یک واحد گازی V94.2 تعدیل می‌گردد. بدین ترتیب که ابتدا توان متوسط ژنراتور در بازه زمانی تست، در سر ترمینال آن ثبت می‌گردد. سپس با توجه به منحنی‌های سازنده، اثر شرایط محیطی مانند دمای هوا، فشار محیط، رطوبت و ... بر روی توان متوسط تولیدی نیروگاه در یک ساعت، اصلاح می‌گردد. عدد بدست آمده برای توان، توان تولیدی واحد با انجام اصلاحات شرایط محیطی و با ضریب توان حین تست است. سپس با توجه به این توان، محاسبات مربوط به تعدیل ضریب توان انجام می‌گردد تا در نهایت، مقدار توان تولیدی واحد در شرایط ضریب توان مرجع بدست آید. شایان ذکر است این رویه برای هر نوع واحد نیروگاهی قابل استفاده خواهد بود.

۲- اصلاح اثر ضریب توان ژنراتور با محاسبات مرحله به مرحله

جهت اصلاح اثر ضریب توان ژنراتور، ابتدا باید توجه داشت که مقدار توان اکتیو تولیدی ژنراتور به توربین وابسته است و قدرت تولیدی توربین گازی هم به شرایط محیطی بستگی دارد. بدین معنی که طراحی واحدهای گازی به گونه‌ای است که محدودیت توان اکتیو تولیدی آنها، معمولاً به وسیله محدودیت توان توربین مشخص می‌گردد؛ مگر در ضریب توان-های بسیار پایین که محدودیت از جانب منحنی قابلیت ژنراتور^۱ تحمیل گردد. بنابراین در حین تست، مقدار حداکثر توان اکتیو تولیدی ژنراتور تنها به توربین وابسته است و ضریب توان واحد تأثیری بر روی آن نمی‌گذارد. تغییر ضریب توان، تنها منجر به تغییر توان راکتیو ژنراتور می‌گردد. پس فرض می‌شود که همان مقدار توان اکتیو تولیدی واحد در حین تست، در حین کار واحد با ضریب توان مرجع هم قابل دستیابی است. حال تغییر ضریب توان، با در نظر گرفتن این نکته که توان اکتیو ژنراتور ثابت مانده و ولتاژ پایانه نیز تقریباً ثابت است، باید همراه با تغییر جریان سه فاز استاتور باشد و از اینجا بدیهی است که مقدار تلفات اهمی ژنراتور تغییر می‌کند. به همین ترتیب جریان ترانسفورماتور اصلی و لذا تلفات اهمی آن تغییر خواهد کرد. مقدار ولتاژ پایانه ژنراتور نیز تغییر ناچیزی

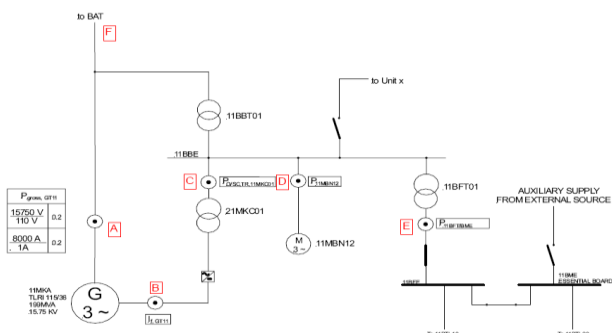
به "قرارداد خرید تضمینی برق"، میان نهاد حاکمیتی و برخی نیروگاه‌های مزبور منعقد گردیده است. در این نوع قراردادها، به طور کلی، اگر واحد نیروگاهی بنا به دلایلی که عامل آن نهاد حاکمیتی است، نتواند ظرفیت قراردادی خود را تولید نماید، هزینه‌ای موسوم به "هزینه ظرفیت" به نیروگاه تعلق می‌گیرد تا از این طریق، جبران خسارت مالی وارده بر بخش خصوصی انجام شده و زمینه انگیزش بیشتر را برای این بخش در جهت سرمایه‌گذاری فراهم نماید.

در قراردادهای مزبور، ظرفیت قراردادی واحد طی دوره بهره‌برداری تجاری مشخص می‌گردد. بدین ترتیب واحد باید بتواند در شرایط مرجع مشخص شده در مفاد قرارداد از قبیل شرایط محیطی و نوع سوخت مصرفی، ظرفیت تعیین شده را در هر دوره بهره‌برداری، احراز نماید. همچنین واحد باید بتواند توان تولیدی را در راندمانی بالاتر از راندمان قید شده هر دوره بهره‌برداری در قرارداد، تأمین نماید. از این رو باید از طریق آزمون عملکرد، توانایی واحد در احراز دو ویژگی ذکر شده مورد سنجش قرار گیرد.

استاندارد ISO 2314 رویه انجام آزمون را برای تعیین سه پارامتر عملکردی زیر ارائه می‌دهد [۱]:

- توان الکتریکی یا مکانیکی خروجی
 - راندمان حرارتی (نرخ حرارتی)
 - انرژی اگزوز توربین (دما و جریان گازهای خروجی)
- طبق این استاندارد، هر گونه انحراف شرایط انجام تست از شرایط مرجع شامل دمای محیط، فشار هوا و ... بایستی توسط منحنی‌های اصلاحی که توسط سازنده ارائه می‌شود، مورد اصلاح و تعدیل قرار گیرد. هم اکنون در کشورمان، آزمون عملکرد واحدها عمدتاً دو مورد اول را از سه پارامتر عملکردی، مورد بررسی قرار می‌دهد.
- یکی از شرایط مرجع، مقدار ضریب توان ژنراتور است که معمولاً برابر با ضریب توان نامی آن انتخاب می‌گردد. بنابراین واحد باید در حین انجام تست، با ضریب توان مشخص شده به تولید انرژی بپردازد. از سوی دیگر به دلیل محدودیت‌های بهره‌برداری و پایداری در شبکه، ممکن است شرایط بهره‌برداری از واحد با ضریب توان مزبور، فراهم نباشد. به عنوان مثال، معمولاً واحدهای با اهمیت‌تر شبکه، در ضریب توان‌هایی بهره‌برداری می‌شوند که واحد توان راکتیو را به شبکه تزریق نماید تا از این طریق حاشیه پایداری آن نیز افزایش یابد. در این میان، اما واحدهای با اهمیت کمتر مثلاً واحدهای گازی ممکن است کمتر مجال پیدا کنند تا بتوانند در ضریب توان نامی خود کار کنند و معمولاً با ضریب توان نزدیک به یک در

استفاده از آن، میزان تغییرات تلفات و مصارف داخلی محاسبه می‌گردد. نقاط اندازه‌گیری کمیت‌ها در شکل مشخص شده است. شایان ذکر است که تپ ترانسفورماتور اصلی واحد در حین تست، بر روی تپ مرجع قرار دارد.



شکل ۱: دیاگرام تک خطی مصرف داخلی واحد [۳]

طبق مستندات [۳]، مقادیر توان، ولتاژ و ضریب توان نامی ژنراتور به شرح زیر می‌باشند:

جدول ۱: مقادیر نامی ژنراتور

S (kVA)	200000
V (V)	15750
PF	0.8 Lag

جهت شروع محاسبات، ابتدا مقادیر ژنراتور که در شرایط تست و در پایانه ژنراتور اندازه‌گیری شده‌اند، در جدول ۲ ارائه شده است:

جدول ۲: مقادیر ژنراتور در شرایط تست

$P_{gross\ test}$ (kW)	138465.6
V test (V)	15728.9
I_{test} (A)	5091.3
$I_{field\ test}$ (A)	777.7

با محاسبه، مقادیر توان ظاهری و ضریب توان به دست می‌آیند:

$$S_{gross\ test} = 138703.51\ kVA$$

$$PF_{test} = 0.99828$$

حال باید تلفات ژنراتور را به تفکیک محاسبه نمود. تلفات اصطکاک در روتور به عنوان تلفات چرخشی ثابت فرض می‌شود. از طرفی این تلفات در خود توان خروجی ژنراتور مستتر است و چون ثابت است، نیازی به اصلاح در شرایط ضریب توان نامی ندارد. تلفات هسته و تلفات اهمی استاتور نیز در خود توان خروجی مستتر هستند اما در شرایط ضریب توان نامی نیاز به اصلاح دارند. طبق مستندات، تلفات هسته ژنراتور در ولتاژ نامی برابر با ۳۴۲ kW و تلفات اهمی استاتور در جریان

دارد که اگرچه، نسبت به تغییر جریان اندک است، اما بهرحال در محاسبات لحاظ می‌گردد.

از سوی دیگر ضریب توان در ژنراتور سنکرون، به وسیله تحریک میدان ژنراتور، امپدانس ژنراتور و بار تعیین می‌شود [۲]. بنابراین با توجه به ثابت بودن امپدانس ژنراتور در حالت دائم و ثابت بودن بار (توان ژنراتور)، ضریب توان در ژنراتور سنکرون، به جریان تحریک آن وابسته خواهد بود. از این رو تغییر ضریب توان، با (فرض توان اکتیو ثابت)، با تغییر جریان تحریک بدست می‌آید. بنابراین، همچنین باید بررسی نمود که تغییر جریان تحریک چه تأثیری بر روی مصارف داخلی واحد می‌گذارد. بدین ترتیب باید بررسی نمود با تغییر ضریب توان، چه تغییری در مصارف و تلفات الکتریکی واحد ایجاد می‌شود.

حال پس از توضیح چگونگی انجام محاسبات، محاسبات پیش گفته در بالا، طبق نقشه تک خطی مصرف داخلی واحد به صورت قدم به قدم، از ژنراتور شروع می‌گردد. ابتدا محاسبات در شرایط تست و سپس در شرایط ضریب توان مرجع انجام می‌گیرد. بنابراین مشخص می‌شود که در هر مرحله، تغییر ضریب توان چه تأثیری بر روی مصارف داخلی و تلفات توان می‌گذارد. در نهایت مجموع این تغییرات تلفات و مصارف داخلی، میزان اصلاح توان تولیدی ژنراتور را مشخص می‌کند. (جهت درک بهتر به فلوجارت بخش پیوست رجوع شود).

۳- محاسبه تلفات و مصارف داخلی واحد در

شرایط تست

در این بخش، تلفات ژنراتور و ترانسفورماتورها و مصارف داخلی واحد در حین تست محاسبه می‌گردد. نکته مهمی که باید بدان توجه داشت این است که میزان تلفات و مصارف داخلی واحد وابسته به مقدار توان تولیدی است. بنابراین بسته به اینکه توان تولیدی ژنراتور در حین تست چه مقدار است، میزان عدد اصلاحی برای تعدیل اثر ضریب توان نیز متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر، اگر در حین اجرای تست در یک بازه زمانی، توان متوسط ژنراتور مقدار ۱۰۰MW باشد و در زمان دیگری به دلیل شرایط محیطی این توان به ۱۳۰MW تغییر یابد، عدد اصلاحی برای تعدیل اثر ضریب توان متفاوت خواهد بود و باید رویه محاسبات برای هر حالت به طور مجزا انجام گردد. البته این میزان تفاوت بستگی به اختلاف مقادیر توان ژنراتور و همچنین دقت مورد نظر دارد که در چه صورت محاسبات اصلاحی مجدداً انجام شود.

شکل ۱ دیاگرام تک خطی واحد [۳] را نشان می‌دهد که با

تلفات در شرایط تست با توجه به مقدار جریان نامی و جریان تست که هر دو در سمت اولیه یا هر دو در سمت ثانویه لحاظ شده‌اند، محاسبه می‌گردد. همچنین باید توجه داشت سوخت واحد، در شرایط تست، گاز طبیعی بوده و بنابراین یکی از مصرف کننده‌های بزرگ داخلی واحد که Injection Pump می‌باشد در مدار نیست. از سوی دیگر چون مصارف داخلی هر واحد توسط خودش تأمین می‌شود و ظرفیت ترانس واحد به گونه‌ای انتخاب شده است که بتواند علاوه بر مصارف داخلی خودش، مصارف بزرگ دیگری را شامل مصارف باس‌بار مشترک، تأمین کند؛ در اینجا مقدار تلفات اهمی ترانس واحد باید بسیار کوچکتر از مقدار نامی آن باشد، زیرا ترانس بار بسیار کوچکی را تغذیه می‌کند. از سوی دیگر به دلیل تغییر ناچیز ولتاژ، انتظار می‌رود که تلفات هسته تغییر چندانی نداشته باشد. به طور مشابه تلفات ترانس تحریک نیز تغییر خواهد نمود. نحوه محاسبه آن نیز مشابه با توضیحات مربوط به ترانس واحد است که به دلیل رعایت اختصار از ذکر آنها خودداری می‌شود. جدول زیر نتایج محاسبات را نشان می‌دهد:

جدول ۴: تلفات ترانس واحد و ترانس تحریک در شرایط تست

۰/۳۱	تلفات اهمی ترانس واحد (kW)
۷/۷۹	تلفات هسته ترانس واحد (kW)
۱/۷۶	تلفات اهمی ترانس تحریک (kW)
۱/۸۱۴	تلفات هسته ترانس تحریک (kW)

سایر مصارف داخلی واحد عبارتند از باس بار ۶/۶ kV، ترانس ۴۰۰ V: ۶/۶ kV واحد و باس بار ۴۰۰ V واحد. مصارف باس بار ۶/۶ kV (به جز ترانس تحریک که در محاسبات لحاظ شد) با تغییر ضریب توان تغییری نمی‌کند. تلفات ترانس ۴۰۰ V: ۶/۶ kV واحد نیز تغییری نخواهد داشت؛ زیرا مصرف کننده جدیدی که از این ترانس تغذیه شود در مدار نخواهد آمد. مصارف باس بار ۴۰۰ V نیز ثابت خواهد ماند. این گفته، طبق بررسی‌ای که در حین تست به عمل آمد، درباره تجهیزاتی از قبیل فن‌های سیستم کولینگ که از این باس تغذیه می‌شوند، مصداق دارد.

مصارف باس‌بار مشترک نیز، طبق توافق قبلی که با توجه به نتایج تست‌های زمان تحویل واحد حاصل شده است، به صورت مساوی میان تمام واحدها تقسیم می‌گردد که برابر با kW ۱۳۳/۳۳ برای هر واحد می‌گردد، اگرچه این میزان مصرف در شرایط تست و شرایط ضریب توان نامی تغییر نمی‌کند. شایان ذکر است تلفات باس‌داکت ژنراتور نیز ثابت و برابر kW ۵۰

نامی برابر با kW ۶۷۶ است. تلفات هسته متناسب با ولتاژ و تلفات اهمی استاتور متناسب با جریان به شرح دو رابطه زیر می‌باشند:

$$P_{test} = P_N * \left(\frac{V_{test}}{V_N}\right)^2 \quad (1)$$

$$P_{test} = P_N * \left(\frac{I_{test}}{I_N}\right)^2 \quad (2)$$

توان سیم پیچ تحریک و تلفات جاروبکها نیز طبق دو رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_{EXC test} = 1.294 * R_{L20} * I_{F test}^2 \quad (3)$$

$$P_{Brush test} = V_{Brush} * I_{f test} \quad (4)$$

که مقاومت سیم‌پیچ تحریک، طبق مستندات در دمای ۲۰°C برابر 0.16202Ω می‌باشد که طبق مدرک [۴] (گزارش آزمون عملکرد توسط سازنده، مطابق با استاندارد IEC 34) جهت تبدیل مقاومت سیم‌پیچ روتور به دمای ۹۵°C، عدد ۱/۲۹۴ به عنوان ضریب اصلاح استفاده شده است. جدول زیر مقدار تلفات ژنراتور را در شرایط تست که با توجه به رابطه‌های بالا بدست آمده‌اند، نشان می‌دهد:

جدول ۳: تلفات ژنراتور در شرایط تست به تفکیک

۳۴۱/۰۸۴	تلفات هسته ژنراتور در شرایط تست (kW)
۳۲۹/۲۷۱	تلفات اهمی ژنراتور در شرایط تست (kW)
۱۲۶/۸۰۲	توان سیم پیچ تحریک در زمان تست (kW)
۱/۵۶	تلفات جاروبکها در زمان تست (kW)

پس از محاسبه تلفات ژنراتور، طبق دیاگرام تک خطی، تجهیز بعدی که از تغییر ضریب توان متأثر می‌گردد، ترانسفورماتور واحد با نسبت تبدیل ۶/۶ kV : ۱۵/۷۵ است، زیرا این ترانس مصارف داخلی واحد از جمله تغذیه ترانسفورماتور تحریک (طبق شکل ۱) را تأمین می‌کند و با تغییر این جریان، تلفات آن نیز تغییر خواهد کرد. در نقشه تک‌خطی و کلاً مستندات این واحد نیروگاهی، ترانسفورماتوری که مصرف داخلی واحد را تأمین می‌کند ترانسفورماتور واحد نام‌گذاری شده است. طبق مستندات، ولتاژ نامی این ترانس در اولیه برابر V ۱۵۷۵۰ و جریان نامی آن در اولیه برابر با A ۲۹۳/۳ می‌باشد. همچنین تلفات اهمی ترانس در شرایط نامی برابر با kW ۵۰/۹ و تلفات هسته در ولتاژ نامی برابر با kW ۷/۸۱ می‌باشد. از طرفی ولتاژ اولیه ترانس در شرایط تست برابر با V ۱۵۷۲۸/۹ و جریان آن برابر با A ۲۲/۸۴ در مستندات تست ثبت شده است. مشابه محاسباتی که در بالا برای ژنراتور انجام شد، در اینجا هم مقدار

بوده که در توان خروجی مستتر است و تأثیری در محاسبات ندارد.

۴- تأثیر ضریب توان نامی و اصلاح محاسبات

جهت تعدیل اثر ضریب توان نامی، باید مصارف و تلفاتی را که متأثر از تغییر ضریب توان می‌گردند مشخص و محاسبه نماییم. در قدم اول باید میزان تلفات ژنراتور در شرایط ضریب توان مرجع مشخص گردد.

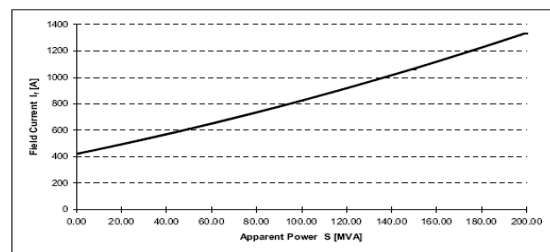
با فرض ثابت ماندن توان تولیدی ژنراتور طبق توضیحی که در بخش ۲ مقاله داده شد، مقدار افزایش جریان استاتور به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$I = \left(\frac{P_{gross\ test}}{\sqrt{3} * V * PF_N} \right) \quad (5)$$

ولتاژ برابر ولتاژ نامی فرض می‌گردد. از اینجا مقدار جریان استاتور برابر با $6344/7$ A بدست می‌آید. بنابراین میزان تلفات اهمی استاتور قابل محاسبه است. تلفات هسته استاتور نیز برابر با تلفات هسته نامی فرض می‌شود.

جهت محاسبه افزایش توان مصرفی سیم‌پیچ تحریک، ابتدا باید میزان تغییرات جریان تحریک را مشخص نمود. این مهم به وسیله منحنی I_F-S واحد که توسط سازنده ارائه شده است، انجام می‌گردد. شکل ۲، منحنی مربوطه را نشان می‌دهد.

apparent power S in MVA	field current I _f in A
0.00	420
49.75	612
99.50	821
149.25	1061
199.00	1333



شکل ۲: منحنی جریان تحریک بر حسب توان ظاهری واحد [۴]

می‌دانیم توان مختلط برابر است با:

$$S = \sqrt{3} * V * I \quad (6)$$

لذا مقدار این توان طبق محاسبه برابر با $173/082$ MVA می‌شود. طبق منحنی شکل ۲، به ازای این توان ظاهری، مقدار

جریان تحریک با درون‌یابی خطی، برابر $1191/29$ A می‌گردد. در نتیجه توان مصرفی سیم‌پیچ تحریک قابل محاسبه خواهد بود. همچنین تلفات جاروبک‌ها نیز مشابه حالت قبل محاسبه می‌گردد.

سپس باید تلفات ترانس تحریک را در این شرایط محاسبه نمود. با توجه به فرض برابر بودن ولتاژ با ولتاژ نامی، مقدار تلفات هسته برابر با تلفات حالت نامی است. تلفات اهمی نیز باید محاسبه گردد. برای بدست آوردن تلفات اهمی ترانس تحریک در این حالت، باید مقدار جریان اولیه (یا ثانویه) ترانس را با توجه به اینکه قبلاً مقدار جریان تحریک بدست آمده است، محاسبه نمود. یکسوساز مورد استفاده در اینجا از نوع پل تریستوری تمام‌کنترل‌شونده می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار متوسط جریان مستقیم بعد از یکسوساز به زاویه آتش تریستورها وابسته بوده [۵] و مقدار این زاویه در این سطح از سیستم مانی‌تورینگ، نمایش داده نمی‌شود، از روش تقریبی زیر بدین منظور استفاده شد. بدین ترتیب که در چندین مورد قبل از اجرای تست، که واحد با توان پایه و در مدار بود، مقدار جریان روتور و همچنین جریان ثانویه ترانسفورماتور تحریک، ثبت شد و در هر مورد نسبت جریان بعد از یکسوساز به جریان ثانویه ترانس تحریک بدست آمد. سپس از این مقادیر میانگین‌گیری شد. با توجه به مقدار بدست آمده، نسبت جریان مؤثر قبل از یکسوساز به جریان متوسط بعد از آن برابر با $0/79$ می‌باشد. باید توجه داشت این مقدار تقریبی بوده و بدلیل عدم دسترسی به مقادیر واقعی‌تر مورد استفاده قرار گرفته است. ضمن اینکه این تقریب، تأثیر بسیار کمی در نتایج کلی محاسبات دارد. حال می‌توان مقدار جریان مؤثر را قبل از یکسوساز و در ثانویه ترانس تحریک بدست آورد که برابر $941.12 \text{ A} = 1191.29 * 0.79$ بدست می‌آید. با توجه به نسبت تبدیل ترانس تحریک که برابر $V 420:6600$ می‌باشد، با صرف نظر از جریان مغناطیس‌کننده، می‌توانیم جریان را در اولیه ترانس تحریک بدست آوریم که با محاسبه، مقدار $59/89$ A بدست می‌آید. حال می‌توان تلفات اهمی ترانس تحریک را در این حالت بدست آورد. از افزایش تلفات در باس-بار $6/6$ kV ناشی از افزایش جریان تحریک، با دقت بسیار خوبی صرف نظر می‌شود. در گام بعدی باید محاسبه نمود، افزایش جریان تحریک، چه تأثیری بر روی تلفات ترانس واحد می‌گذارد.

تلفات هسته ترانس واحد در این حالت همچنین برابر با مقدار نامی آن فرض می‌شود. برای محاسبه تلفات اهمی این ترانس، باید ابتدا جریان آن را مشخص نمود و چون در حالت تست، با

توجه به جریان اولیه ترانس، تلفات محاسبه شد، در این حالت نیز باید جریان اولیه این ترانس را بدست آورد. مطابق روش زیر این مهم انجام می‌گردد. ابتدا میزان افزایش جریان تحریک در سیم پیچ تحریک بدست می‌آید:

$$\Delta I_f = I_{f,PFn} - I_{f\ test} = 413.589\ A \quad (7)$$

سپس با استفاده از ضریب تبدیل جریان یکسوساز (۰/۷۹)، این میزان افزایش جریان را به قبل از یکسوساز و ثانویه ترانس تحریک برده که برابر با $326/735\ A$ می‌شود. این جریان در اولیه ترانس تحریک با توجه به نسبت تبدیل آن برابر با $20/792$ می‌شود. این جریان از ثانویه ترانس واحد تأمین می‌شود. حال این جریان را به اولیه ترانس واحد برده که برابر با مقدار تقریبی $9\ A$ بدست می‌آید. بنابراین، میزان جریان در اولیه ترانس واحد برابر مقدار جریان اولیه در شرایط تست ($22/84$) به علاوه مقدار افزایش آن ($9\ A$) می‌شود که برابر با $31/84\ A$ می‌گردد. حال می‌توان تلفات اهمی این ترانس را در این حالت بدست آورد.

همانطور که پیشتر ذکر شد، سایر مصارف و تلفات مانند مصارف باس‌بارهای $6/6\ KV$ و $400\ V$ مانند شرایط تست می‌باشند. نتایج محاسبات در این حالت، در جدول زیر خلاصه شده است:

جدول ۵: مصارف و تلفات واحد در شرایط ضریب توان مرجع

۵۱۱/۳۵	تلفات اهمی ژنراتور در ضریب توان نامی (kW)
۳۴۲	تلفات هسته ژنراتور در ضریب توان نامی (kW)
۲۹۷/۵۳۵	توان سیم پیچ تحریک (kW)
۲/۳۸	تلفات جاروبک‌ها (kW)
۰/۶	تلفات اهمی ترانس واحد (kW)
۷/۸۱	تلفات هسته ترانس واحد (kW)
۴/۱۹	تلفات اهمی ترانس تحریک (kW)
۱/۸۱	تلفات هسته ترانس تحریک (kW)

مجموع ارقام مندرج در جداول ۳ و ۴، میزان تلفات و مصارف واحد را در شرایط تست و جدول ۵، این میزان را در شرایط ضریب توان مرجع نشان می‌دهد. با کسر نمودن مقادیر، میزان افزایش تلفات و مصارف داخلی واحد در حالت ضریب توان مرجع نسبت به حالت تست تا قبل از ترانس اصلی واحد، بدست می‌آید که برابر است با:

$$\Delta P_{Correction} = \sum(P_{L,D})_{PFn} - \sum(P_{L,D})_{test} = 357.28\ kW \quad (8)$$

بدین معنی که با تبدیل ضریب توان واحد در حین تست به ضریب توان مرجع، باید مقدار $357/28\ kW$ از توان تولیدی ژنراتور کسر گردد. باید توجه داشت این محاسبات، تا قبل از ترانس اصلی واحد انجام شد، در حالی که معمولاً در قراردادهای خرید برق، نقطه تحویل توان واحد به شبکه، سر بوشینگ فشار قوی ترانسفورماتور واحد م باشد. به عبارت دیگر باید، میزان تغییر تلفات را در ترانسفورماتور اصلی واحد نیز محاسبه نمود.

طبق مستندات، توان ظاهری ترانسفورماتور اصلی واحد برابر با $200\ MVA$ و ولتاژ نامی آن در سمت اولیه برابر با $15750\ V$ می‌باشد. بنابراین جریان نامی آن در سمت اولیه برابر با $7331/44\ A$ می‌شود. تلفات اهمی این ترانس برابر با $482/1\ kW$ و تلفات هسته آن برابر با $101/5\ kW$ می‌باشد.

ابتدا تلفات ترانسفورماتور اصلی در شرایط تست محاسبه می‌گردد. همانطور که پیشتر ذکر شد، مقدار جریان استاتور در شرایط تست برابر بوده است با $5091/3\ A$ که از این مقدار، $22/84$ به سمت ترانس واحد رفته است. بنابراین مقدار جریان اولیه ترانس اصلی واحد در شرایط تست برابر با $5068/5\ A$ می‌شود. همچنین ولتاژ اولیه ترانس اصلی برابر با $15728/9\ V$ بوده است. در نتیجه مقدار تلفات اهمی و تلفات هسته ترانس اصلی را در شرایط تست می‌توان بدست آورد. با توجه به رابطه زیر:

$$P_{ohmic\ test} = P_{ohmic,n} * \left(\frac{\sqrt{3} * V_{test} * I_{test}}{200000} \right)^2 \quad (9)$$

هر چند با توجه به تفاوت ناچیز ولتاژ اولیه ترانس در زمان تست با ولتاژ نامی آن (ولتاژ نامی: $15750\ V$ و ولتاژ زمان تست: $15728/9\ V$) اگر مستقیماً تلفات اهمی نامی ترانس را در مجذور نسبت جریان تست به جریان نامی طبق رابطه زیر:

$$P_{ohmic\ test} = P_{ohmic,n} * \left(\frac{I_{test}}{I_n} \right)^2 \quad (10)$$

ضرب می‌نمودیم، پاسخ‌ها بسیار به هم نزدیک می‌شدند. همچنین تلفات هسته نیز بسیار نزدیک به تلفات نامی خواهد بود.

جهت محاسبه تلفات ترانس اصلی در شرایط ضریب توان مرجع ابتدا باید جریان را در اولیه ترانس بدست آورد. مقدار جریان استاتور در شرایط ضریب توان مرجع برابر با $6344/7$ بدست آمد. از سوی دیگر مقدار جریان در اولیه ترانس واحد در شرایط ضریب توان مرجع برابر با $31/84\ A$

شد. لذا جریان سمت اولیه ترانس اصلی واحد برابر با A ۶۳۱۲/۹ می‌گردد. لذا تلفات اهمی ترانس اصلی قابل محاسبه خواهد شد. تلفات هسته نیز برابر با تلفات نامی فرض می‌گردد. جدول زیر، نتایج محاسبات مربوطه را نشان می‌دهد:

جدول ۶: تلفات ترانسفورماتور اصلی واحد در شرایط تست و شرایط ضریب توان مرجع

۲۲۹/۸۰۲	تلفات اهمی در شرایط تست (kW)
۱۰۱/۲۲۸	تلفات هسته در شرایط تست (kW)
۳۵۷/۴۵۱	توان اهمی در شرایط ضریب توان مرجع (kW)
۱۰۱/۵	تلفات هسته در شرایط ضریب توان مرجع (kW)

بنابراین با توجه به جدول بالا، تلفات ترانسفورماتور اصلی واحد در شرایط ضریب توان مرجع نسبت به شرایط تست به میزان ۱۲۷/۹۲ kW افزایش خواهد یافت. حال با توجه به عدد بدست آمده از رابطه (۸)، مجموع افزایش تلفات و مصارف داخلی واحد از قلب ژنراتور تا سر بوشینگ فشار قوی ترانسفورماتور اصلی واحد در شرایط ضریب توان مرجع نسبت به شرایط تست، برابر می‌شود با:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Correction, final} &= 357.28 + 127.92 \\ &= 485.2 \text{ KW} \end{aligned} \quad (11)$$

بنابراین باید به میزان ۴۸۵/۲ kW در این تست، از توان خالص تولیدی واحد که پس از ترانسفورماتور اصلی اندازه‌گیری می‌شود کاسته شود تا اثر ضریب توان در نتایج تست تعدیل گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی محاسباتی برای تعدیل اثر ضریب توان در نتایج آزمون عملکرد یک واحد گازی ارائه و برای یک تست واقعی استفاده گردید. به دلیل محدودیت‌های بهره‌برداری و پایداری که در شبکه قدرت وجود دارد، معمولاً نمی‌توان در هنگام اجرای تست، واحد را با ضریب توان مرجع که عمدتاً برابر با ضریب توان نامی انتخاب می‌گردد، بهره‌برداری نمود. بنابراین باید به گونه‌ای اثر ضریب توان را در نتایج تست لحاظ نمود. با کمک محاسبات مرحله به مرحله‌ای که در این روش انجام گرفت، می‌توان مشخص نمود که با تغییر ضریب توان ژنراتور در شرایط تست به ضریب توان مرجع، به چه میزان مصارف داخلی و تلفات الکتریکی واحد تغییر می‌کند. نکته مهم این است که اگرچه در سال‌های اول بهره‌برداری، معمولاً

واحد با اختلاف می‌تواند ظرفیت تضمینی را تأمین نماید، اما با گذشت زمان، به تدریج از ظرفیت واحد کاسته شده و تعدیل اثر ضریب توان، حائز اهمیت خواهد شد. همچنین با توجه به نرخ قابل ملاحظه هزینه ظرفیت، تعدیل اثر ضریب توان که باعث صحت بیشتر نتایج آزمون و کاهش ظرفیت تضمینی واحد می‌گردد، رقم قابل توجهی را به لحاظ ریالی، در طول دوره قراردادی ایجاد خواهد کرد که در صورت لحاظ نکردن، موجب افزایش بهای تمام شده برق برای مشترکین می‌گردد - البته اگر مورد بسیار نادری اتفاق افتد که ضریب توان در حین تست، کمتر از ضریب توان مرجع باشد (با فرض اینکه ضریب توان آن قدر پایین نباشد که محدودیتی برای تولید توان اکتیو از جانب منحنی قابلیت ژنراتور تحمیل گردد)، تعدیل اثر آن به دلیل کاهش تلفات و مصارف داخلی واحد، باعث افزایش ظرفیت واحد می‌گردد. در پایان باید توجه داشت، اعدادی که برای تعدیل اثر ضریب توان در این مقاله، بدست آمد برای همین نوع واحد و در همین مقادیر تست (از جمله توان خروجی ژنراتور) اعتبار دارد. به بیان دیگر، برای هر نوع واحد، این روش نتایج مختص خود را بدست می‌دهد. همچنین با تغییر مقادیر در آزمونی دیگر، مثلاً حالتی که توان تولیدی بنا به دلایلی مانند شرایط محیطی تغییر کند، باید مجدداً اعداد را محاسبه نمود. هر چند با توجه به دقت مورد نظر، می‌توان در این زمینه تصمیم‌گیری نمود.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از آقایان مهندسین بوی‌افراز (مسئول نظارت)، توکلی و قنبری (کارشناسان شرکت برق) و همچنین مدیران و کارشناسان نیروگاه فردوسی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] "International Standard ISO 2314: Gas turbines – Acceptance tests". Third edition, 2009.
- [۲] فیتزجرالد، کینگسلی و اومنس، "ماشین‌های الکتریکی". ترجمه بهزاد قهرمان، مشهد، نشر نما، ۱۳۸۱.
- [۳] مجموعه اسناد و مدارک فنی نیروگاه گازی فردوسی.
- [4] SIEMENS, "Performance Test Report, Technical Report, Ref. (DGTRP-2009-000169/1)".
- [۵] پ. س. سن، "ماشین‌های الکتریکی؛ تحلیل، بهره‌برداری، کنترل". ترجمه مهرداد عابدی و محمدتقی نبوی، تهران، کارآفرینان بصیر، ۱۳۸۳.

پیوست

۱- با توجه به اهمیت مسائل زیست محیطی، پیشنهاد می-گردد در آزمون‌های عملکردی، پارامتر سوم که انرژی آگزوز (دما و گازهای خروجی) توربین می‌باشد نیز مورد بررسی قرار گیرد. اگرچه این پارامتر در هنگام تحویل نیروگاه تست می-گردد، اما در سایر موارد از جمله در انجام آزمون‌های عملکردی در قراردادهای خرید تضمینی برق، کمتر به آن توجه می‌شود.

۲- رویه انجام محاسبات مرحله به مرحله:



۳- مقادیر نامی برخی از تجهیزات - که در این مقاله استفاده شدند - به شرح جداول ذیل است.

مقادیر نامی ژنراتور

۲۰۰۰۰۰	توان (kVA)
۱۵۷۵۰	ولتاژ پایانه (V)
۰/۸	ضریب توان
۵۰	فرکانس (Hz)
۳۴۲	تلفات هسته (kW)
۶۷۶	تلفات بار کامل (kW)

مقادیر نامی ترانسفورماتور اصلی واحد

۲۰۰۰۰۰	توان (kVA)
۱۵/۷۵ : ۴۰۰	ولتاژ (kV)
۱۰/۱/۵	تلفات هسته (kW)
۴۸۲/۱	تلفات بار کامل (kW)

مقادیر نامی ترانسفورماتور واحد

۸۰۰۰	توان (kVA)
۱۵۷۵۰ : ۶۶۰۰	ولتاژ (V)
۷/۸۱	تلفات هسته (kW)
۵۰/۹	تلفات بار کامل (kW)

مقادیر نامی ترانسفورماتور تحریک

۹۳۰	توان (kVA)
۶۶۰۰ : ۴۲۰	ولتاژ (V)
۱/۸۱	تلفات هسته (kW)
۷/۷۳	تلفات بار کامل (kW)

۴- یک نمونه از منحنی‌های اصلاحی شرایط محیطی واحد مورد مطالعه (مربوط به دمای ورودی کمپرسور)

