نام درس: تحلیل سیستم های انرژی الکتریکی ۱

مراجع:

1. بررسی سیستم های قدرت، مولف: هادی سعادت؛ مترجمان: احد کاظمی، شهرام جدید، حیدرعلی شایانفر
2. Power System Analysis and Design, Glover, fifth edition, 2012.
3. Power System Analysis, Grainger, Stevenson.
4. طراحی و بهره برداری از سیستم های توزیع انرژی الکتریکی، مولف: علی اکبر گلکار، انتشارات دانشگاه خواجه نصیر، چاپ سوم (مرجع فصل چهارم).

ارزشیابی درس:

- ✓ امتحان میانترم: ۶ نمره (۲ فصل اول)
- ✓ امتحان پایانترم: ۱۲نمره
- ✓ حضور موثر در کلاس و کوئیزها: ۱/۵ نمره
- ✓ تمرین ها و پروژه های اختیاری شبیه سازی: تا سقف ۱/۵ نمره جمع کل: ۲۱ نمره

مدرس: دکتر علی کریمی

فهرست مطالب درس

فصل اول: مقدمات سیستم های قدرت و آشنایی با مفاهیم توان و پریونیت (نسبت به واحد)

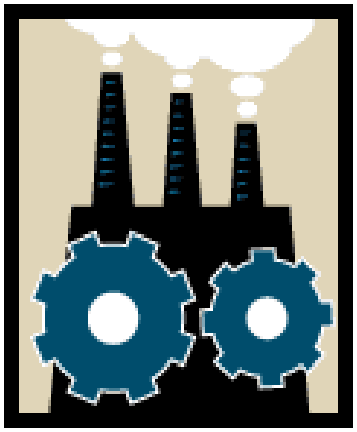
فصل دوم: پارامترهای خط انتقال نیرو (مقاومت، اندوکتانس، ظرفیت خازنی و کندوکتانس)

فصل سوم: مدلسازی و عملکرد خطوط انتقال (خطوط کوتاه، متوسط و بلند، پخش توان و روش های جبرانسازی)

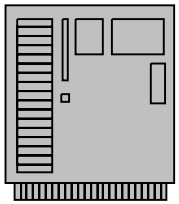
فصل چهارم: آشنایی با شبکه های توزیع برق و محاسبات افت ولتاژ

فصل پنجم: مقدمه ای بر مطالعات پخش بار (Load Flow) در شبکه قدرت

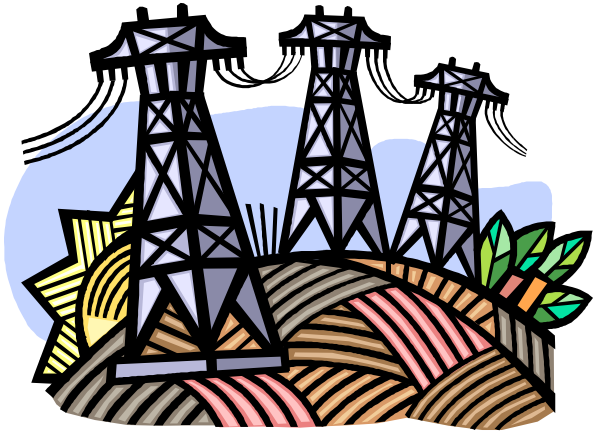
مقدمه ای از سیستم های انرژی الکتریکی (سیستم های قدرت) و وضعیت ایران



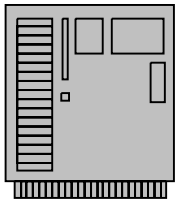
تولید کننده



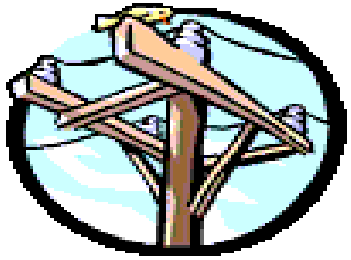
ترانسفورماتور افزاینده



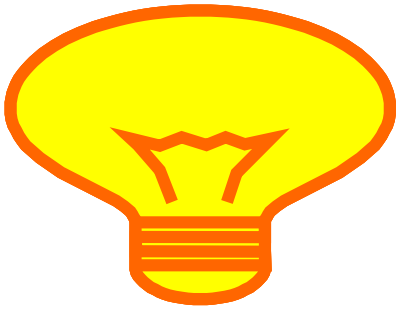
سیستم انتقال نیرو



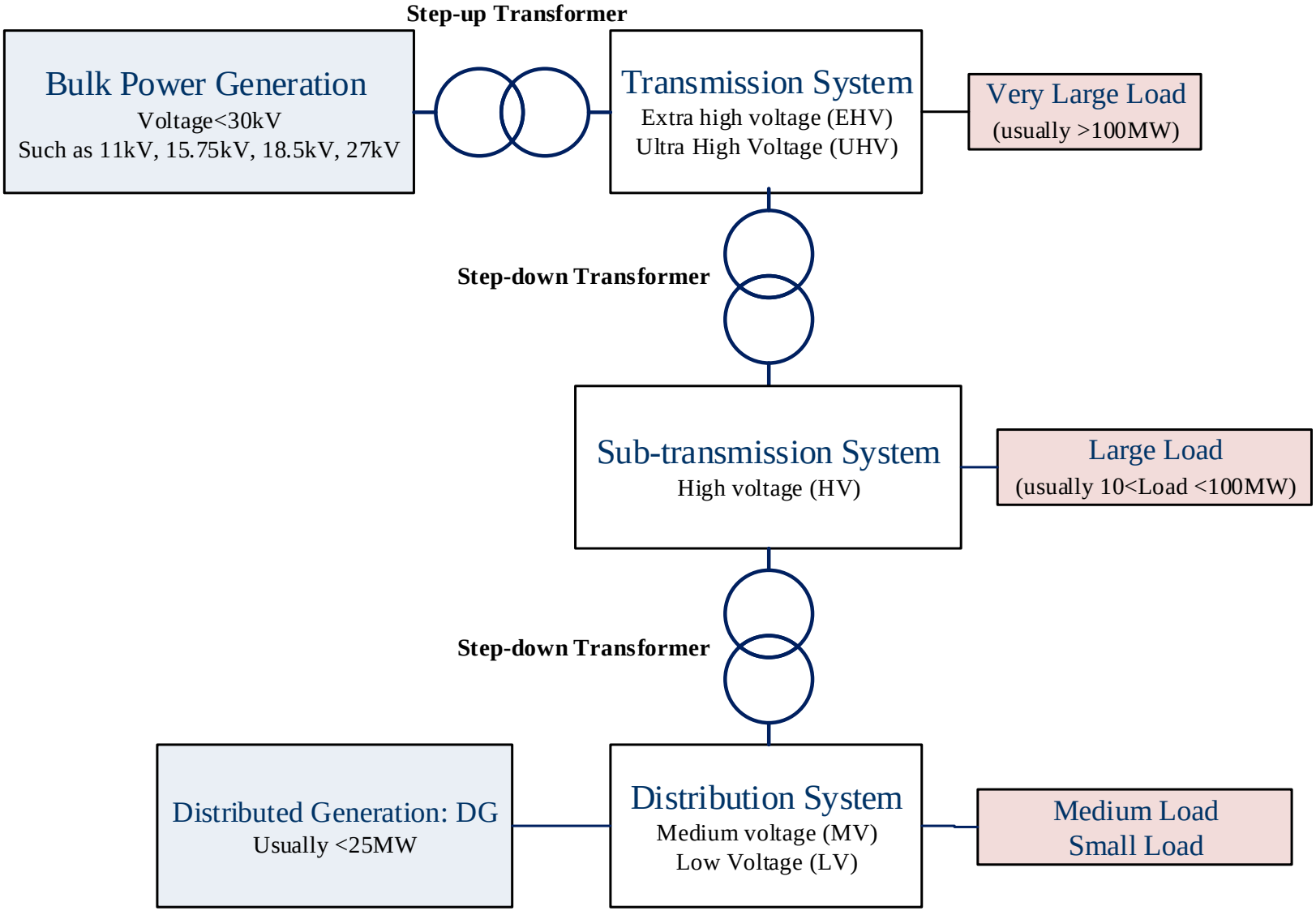
پست های توزیع
و فوق توزیع



سیستم توزیع



مصرف کننده

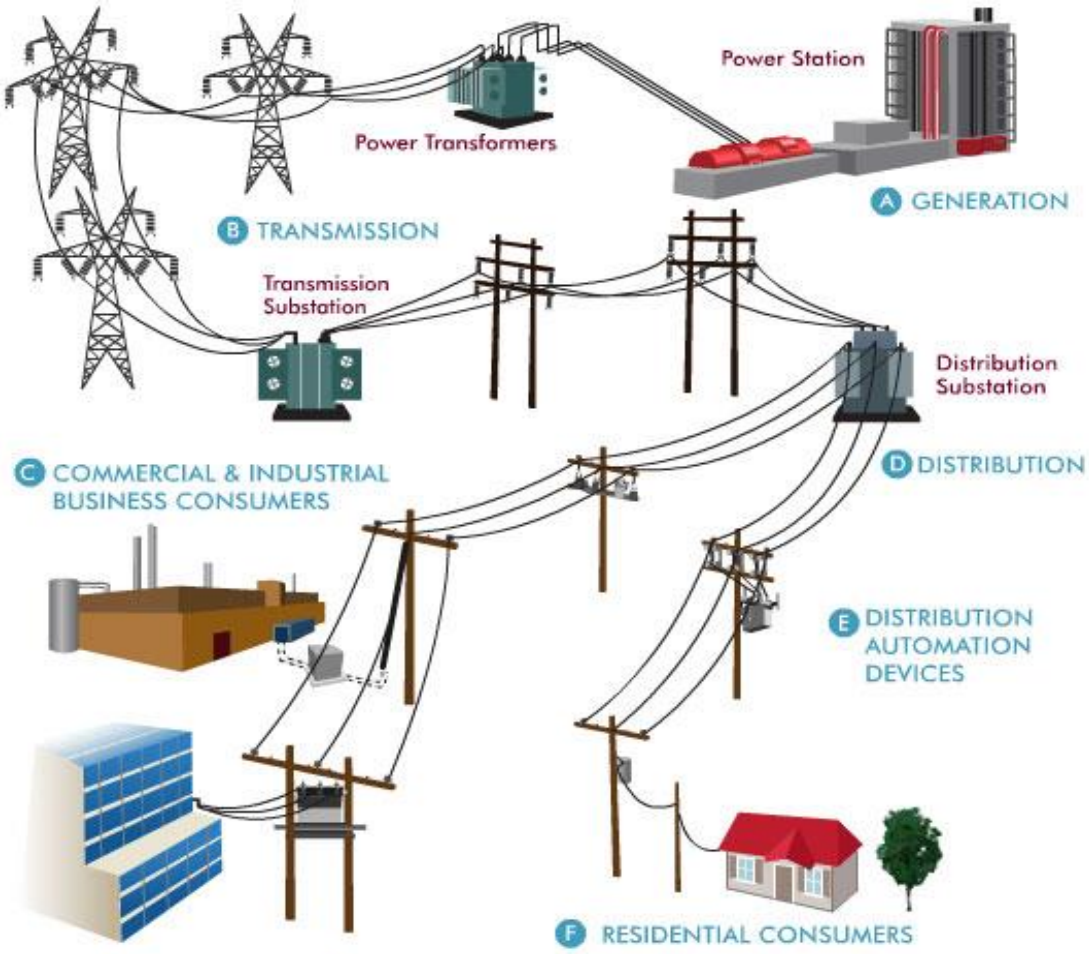

Step-up Transformer
Bulk Power Generation
Voltage<30kV
Such as 11kV, 15.75kV, 18.5kV, 27kV
Transmission System
Extra high voltage (EHV)
Ultra High Voltage (UHV)
Very Large Load
(usually >100MW)
Step-down Transformer
Sub-transmission System
High voltage (HV)
Large Load
(usually 10<Load <100MW)
Step-down Transformer
Distributed Generation: DG
Usually <25MW
Distribution System
Medium voltage (MV)
Low Voltage (LV)
Medium Load
Small Load

سطوح ولتاژ با توجه به استانداردهای مختلف تقسیم بندی می شود؛ به طور مثال در یک تقسیم بندی:

- ✓ **گروه ولتاژ ضعیف یا LV (Low Voltage): ولتاژهای تا ۱kV مانند ۱۱۰، ۲۲۰، ۴۰۰ ولت**
- ✓ **گروه ولتاژ متوسط یا MV (Medium Voltage): ولتاژهای بالاتر از ۱kV و کمتر از ۶۳kV مانند ۱۱، ۲۰ و ۳۳ کیلوولت**
- ✓ **گروه ولتاژ زیاد یا HV (High Voltage): ولتاژهای ۶۳kV و بالاتر تا ۲۳۰kV مانند ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت**
- ✓ **گروه ولتاژ خیلی زیاد یا EHV (Extra High Voltage): مانند ولتاژهای ۲۳۰، ۴۰۰، ۵۰۰و ۷۶۵ کیلوولت**
- ✓ **گروه ولتاژ فوق العاده زیاد یا UHV (Ultra High Voltage): به ولتاژهای ۸۰۰kV و بالاتر**

بخش های شبکه قدرت

1) تولید انرژی الکتریکی (نیروگاه های بزرگ یا Bulk Power Generation و نیروگاه های کوچک یا Distributed Generation)
2) شبکه ارتباطی بین تولید و مصرف (خطوط انتقال، فوق توزیع و توزیع و همچنین، و پست های الکتریکی)
3) مصرف (خانگی، تجاری، صنعتی، کشاورزی، عمومی)



برخی از ویژگی های مهم سیستم های قدرت

بزرگترین ماشین دست ساز بشر (Interconnected System)

- در سطح یک کشور بسیار گسترده
- با اتصال کشورها دامنه آن وسیعتر شده (مثلا اتصال شبکه های کشورهای اروپایی به هم)

یکی از پیچیده ترین سیستم ها!!

- انواع تکنولوژی های تولید برق (نیروگاه های متنوع)
- تجهیزات الکتریکی متنوع (انواع خطوط، انواع تجهیزات پست های برق)
- سخت افزارها و نرم افزارهای پیچیده در مراکز کنترل شبکه (دیسپاچینگ) و سیستم های مخابراتی برای انتقال دیتا در صنعت برق

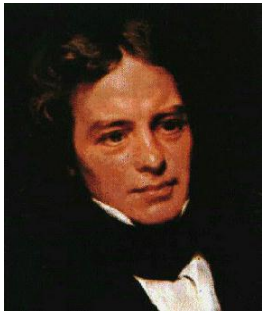
از لحاظ هزینه بسیار گران

- ساخت یک نیروگاه سیکل–ترکیبی هزارمگاواتی حدود یک میلیارد دلار هزینه دارد (ظرفیت کشور ما بالای ۷۰هزار مگاوات است!!)
- ساخت یک خط انتقال 400kV بیش از ۷۰۰ میلیون تومان بر کیلومتر هزینه دارد (طول خطوط 230kV و 400kV در ایـران حـدود ۵۲هزار کیلومتر است)!
- یک پست 400/63kV حدود ۱۰۰ میلیارد تومان هزینه دارد!

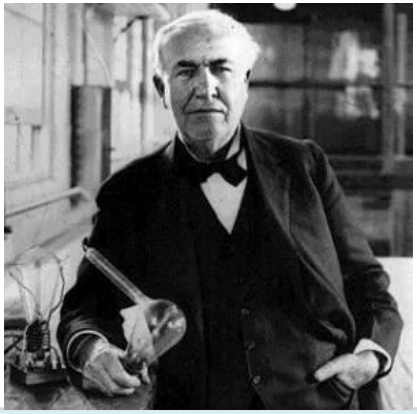
تاریخچه سیستم های قدرت

❖ در سال ۱۸۰۰ میلادی، الکساندر ولتا، اولین پیل الکتریکی را ساخت.

❖ میشل فارادی در سال ۱۸۳۱ موفق به تولید برق از طریق جسم گردان شد.

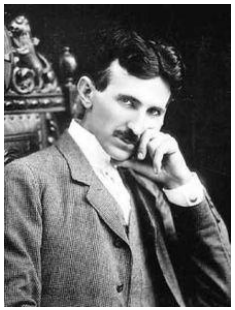
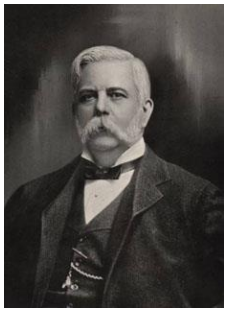


❖ ادیسون بعنوان پایه گذار صنعت برق، در سال ۱۸۷۸ اولین شبکه برق را برای تامین روشنایی در محله ای از نیویورک تاسیس کرد (به صورت DC).

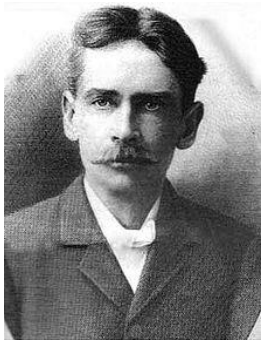


- ✓ شبکه اولیه از ژنراتورهای DC و کابل های زیرزمینی تشکیل شده بود
- ✓ پس از آن شرکت های زیادی تحت امتیاز ادیسون برای روشنایی تاسیس شدند.
- ✓ مشکل اصلی سیستم DC در آن زمان، تلفات RI^2 زیاد به دلیل سطح ولتاژ کم خطوط بود

تاریخچه سیستم های قدرت

- تاسیس اولین شبکه برق AC در سال ۱۸۹۱ توسط جورج وستینگهاوس (یکی از رقبای اصلی توماس ادیسون در اجرای سیستم برق آمریکا) به کمک نیکولای تسلا
  - ✓ حق امتیاز موتور القایی که از اختراعات ثبت شده تسلا است، توسط جورج وستینگهاوس خریداری شد.
  - ✓ ساخت ترانسفورماتور جریان متناوب توسط ویلیام استانلی تحولی برای پیشرفت سیستم AC در برابر DC بود.
  - ✓ مزایای سیستم AC نسبت به DC در آن زمان:
    - افزایش سطح ولتاژ با ترانسفورماتور و تلفات انتقال کمتر
    - تولید راحتتر (عدم وجود کموتاتور در ژنراتورهای AC)
    - مصرف کنندگان بیشتر (با توجه به رشد موتورهای القایی)
  - ✓ دو نکته مهم در سیستم AC: چند فازه بودن؟ فرکانس؟



- در سال ۱۸۹۳، شرکت ادیسون کالیفرنیای جنوبی اولین سیستم سه فاز 2/3kV AC را نصب کرد.

تاریخچه سیستم های قدرت

✓ مزایای سیستم سه فاز:

- تولید راحتتر در نیروگاهها
- توان لحظه ای ثابت (بر خلاف تک فاز)؛ کمترین تعداد سیم برای ثابت بودن توان لحظه ای
- به راحتی قابل تبدیل به تک فاز است (ولتاژ یکی از فازها نسبت به نول)

✓ در سالهای اولیه پیدایش سیستم های سه فاز، فرکانس های ۲۵ تا ۱۳۳ هرتز در آمریکا استفاده می شد؛ اما پس از چند سال، فرکانس استاندارد در آمریکا ۶۰ هرتز گردید. در اروپا نیز فرکانس استاندارد ۵۰ هرتز تعیین شد.

- در ادامه، شرکت های برق زیادی در کشورهای مختلف شکل گرفتند و سیستم قدرت بهم پیوسته در هر کشور شکل گرفت (جایگزین شبکه های محلی و local).
- با توجه به اینکه انتقال انرژی باید به مناطق دوردست امکان پذیر می شد، سطوح ولتاژ نیز افزایش یافتند؛ به طور مثال، سطح EHV با ولتاژ 765kV اولین بار در آمریکا در سال ۱۹۶۹ به بهره برداری رسید.
- اگرچه با گسترش شبکه های AC در شبکه قدرت، کاربرد ولتاژ DC برای انتقال برق بسیار کاهش یافت، اما پس از سال های ۱۹۷۰ دوباره سطوح ولتاژ بسیار بالای DC (HVDC) مطرح گردید (برای فواصل بسیار زیاد خطوط HVDC توجیه فنی دارند. همچنین، اتصال کشورهای مختلف به صورت آسنکرون)
- امروزه، کاربرد سیستم های DC در سطوح ولتاژ پایین در کنار ولتاژهای AC در شبکه های هوشمند برق مطرح شده و پیش بینی می شود در آینده ریزشبکه های DC افزایش یابند.

تاریخچه صنعت برق در ایران

- ناصرالدین شاه قاجار در طی سلطنت ٤٩ ساله خود سه بار به اروپا سفر کرد و در یکی از سفرها، یک مولد به قدرت تقریبی ۳ کیلووات به منظور تامین روشنایی بخشی از کاخ سلطنتی گلستان را برای نخستین بار وارد ایران نمود؛ این مولد احتمالا از نوع Otto (با سوخت زغال سنگ یا نفت) بوده و ۸ چراغ را روشن میکرد (سال ١٢٦٤ ه ش).

- ۱۸ سال بعد، با دستور مظفرالدین شاه قاجار، در سال ۱۲۸۲ یک دستگاه مولد برق با موتور نوع اتو- دویتس (موتور گازی خود تغذیه شونده) با قدرت ۱۲ اسب بخار و ۱۱۰ ولت برای تامین روشنایی حرم امام رضا به بهره برداری رسید؛

- در سال ۱۲۸۵ حاج امین الضرب (مهدوی؛ متولد ١٢٤٦ و فوت در ۱۳۱۱ ه ش؛ تاجر اصفهانی، نماینده دوره های اول و ششم مجلس ملی) کارخانه برق شهری را برای تامین برق روشنایی با قدرت ٤٠٠ کیلووات احداث نمود. شبکه آن ۲۲۰/۳۸۰ ولت AC و فقط ۷ ساعت در مدار بود؛ ژنراتور از طریق یک کلید قدرت به یک شینه (Busbar) توزیع متصل میشد و از طریق ٦ کلید نصب شده دو تابلوی سنگ مرمری، شش خط را تغذیه می نمود:

- ✓ گلستان
- ✓ ناصریه
- ✓ لاله زار
- ✓ بهارستان
- ✓ امین حضور
- ✓ مریضخانه

تاریخچه صنعت برق در ایران

- در سال ۱۳۰٤ ه ش، به دلیل افزایش تقاضا، امین الضرب اقدام به خرید ۷ مولد ۷۵ کیلوواتی و ۲ مولـد ۱۵۰ کیلـواتی نمود.
- در سال ۱۳۱٦ه ،ش نیروگاه بخاری ساخت کارخانه اشکودای چکسلواکی با قدرت ٦٤۰۰=۱٦۰۰*٤ کیلو وات در محل کنونی شرکت برق منطقه ای تهران نصب شد و به بهره برداری رسید؛
- قانون تاسیس وزارت آب و برق در تاریخ ۱٦/۱/۱۳٤۳ به دولت ابلاغ شد؛
- در سال ۱۳٤۸ شرکت تولید وانتقال نیروی برق ایران (توانیر) با این اهداف آغاز به کار کرد:
  - ✓ تهیه و تدوین و پیشنهاد استراتژیها و سیاستها و برنامه های برق کشور؛
  - ✓ ایجاد هماهنگی و نظارت بر شبکه سراسری برق؛
  - ✓ برنامه ریزی و نظارت بر مصارف مختلف برق کشور؛
  - ✓ حفظ یکپارچگی و پایداری شبکه سراسری برق کشور.
- مروری بر ساختار صنعت برق ایران در دوران مختلف :
  - ✓ دوره اول : فعالیت بخش خصوصی (سالهای ۱۳۱٦-۱۲۸۵)
  - ✓ دوره دوم: فعالیت موازی بخشهای خصوصی و عمومی
  - ✓ دوره سوم: تمرکزگرایی و فعالیت مطلق بخش عمومی و دولتی(۱۳٦۵-۱۳٤۳)
  - ✓ دوره چهارم: گرایش به عدم تمرکز، اصلاح ساختار تشکیلاتی و گرایش به جلب مشارکت بخش خصوصی (سالهای بعد از ۱۳٦۵)

تاریخچه صنعت برق در ایران

- در سال ۱۳۸۳، در راستای تجدیدساختار در صنعت برق ایران و اجرای بازار برق، شرکت مدیریت شبکه برق ایران فعالیت خود را آغاز نمود.
- نقش شرکت مدیریت شبکه برق ایران به عنوان ISO شبکه (Independent System Operator) است؛ هم بخش کنترل و دیسپاچینگ شبکه سراسری (کنترل همه نیروگاههای شبکه -به جز مولدهای مقیاس کوچک یا DGها- و بهره برداری از شبکه انتقال) و هم بخش اجرای بازار برق را بر عهده دارد.
- دلایل راه اندازی بازار برق در ایران:
  - ✓ ایجاد فضای رقابتی در بخشهای تولید و توزیع برق
  - ✓ تامین منابع مورد نیاز از طریق حضور بخش غیر دولتی در سرمایه گذاری
  - ✓ افزایش بهره وری اقتصادی
- در کشورهای توسعه یافته (آمریکا و کشورهای اروپایی)، شکل گیری بازارهای برق به سال های ۱۹۸۰ به بعد برمیگردد. کشورهای آسیایی عمدتا از سال ۲۰۰۰ به بعد تصمیم به تجدساختار در صنعت برق گرفته اند.
- بنابراین، در کنار مباحث فنی شبکه قدرت (بهره برداری و کنترل شبکه)، موضوع بهره برداری اقتصادی از سیستم یا اجرای بازار برق نیز اهمیت دارد.

بخش اول شبکه قدرت–تولید انرژی در نیروگاه ها

انواع نیروگاه ها:

نیروگاه های حرارتی- طیف وسیعی از تولید انرژی در جهان

- ✓ بخاری (سوخت فسیلی-تبدیل آب به بخار)
- ✓ گازی (سوخت فسیلی-هوای محیط داغ می شود)
- ✓ سیکل ترکیبی (سوخت فسیلی-ترکیب واحدهای گازی و بخاری)
- ✓ هسته ای (سوخت اورانیوم غنی شده-آب به بخار)
- ✓ دیزلی (سوخت فسیلی-موتور درون سوز)
- ✓ موتورهای گازسوز (سوخت فسیلی-موتور رفت و برگشتی)

عمدتا به صورت تجدیدپذیر

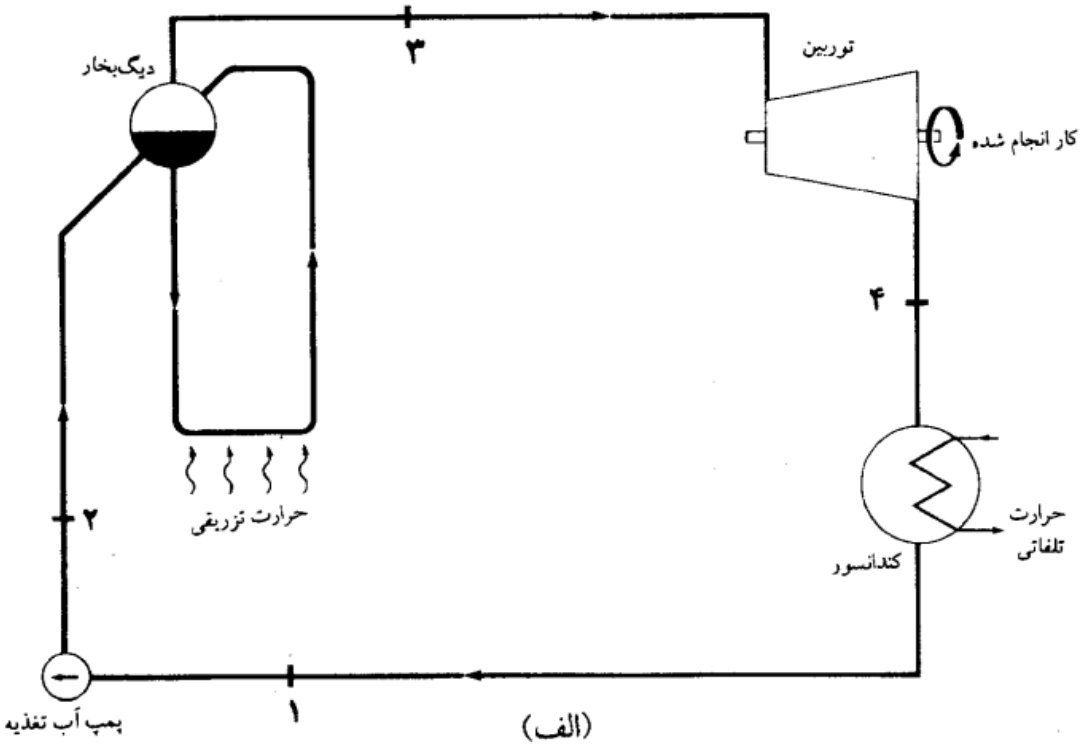
- ✓ آبی
- ✓ تلمبه ذخیره ای (دارای دو سد بالایی و پایینی، کار ذخیره انرژی را انجام می دهد)
- ✓ بادی (توربین های بادی)
- ✓ خورشیدی (هم به صورت فتوولتائیک هم به صورت CSP یا Concentrated Solar Power)
- ✓ و نیروگاه های دیگر (پیل سوختی (Fuel Cell)، زمین گرمایی، جذر ومد، بیوماس و ...)

- ❖ اکثر نیروگاه های بزرگ (Bulk Power Generation) شامل بخاری، هسته ای، گازی، سیکل ترکیبی، آبی و تلمبه ذخیره ای است.
- ❖ بسیاری از نیروگاه های بادی، خورشیدی، دیزلی، موتورهای گازسوز و سایر نیروگاه ها به صورت تولید پراکنده یا DG استفاده می شوند (اگرچه بادی و خورشیدی بزرگ هم وجود دارد).

بخش اول شبکه قدرت–تولید انرژی در نیروگاه ها

نمای ساده نیروگاه بخاری (بخار توربین را میچرخاند)

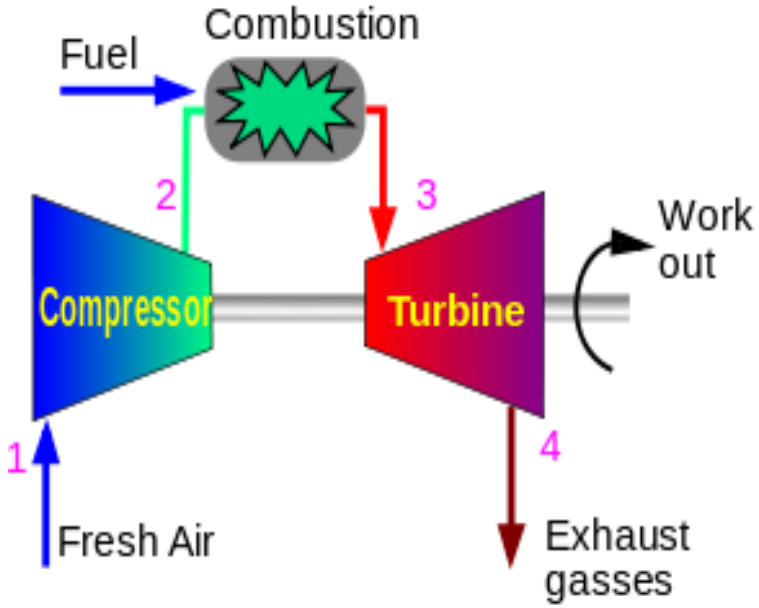
- ✓ مصرف سوخت فسیلی (زغال سنگ، گاز طبیعی، نفت کوره، گازوئیل)
- ✓ هزینه سرمایه گذاری نسبتا زیاد
- ✓ هزینه بهره برداری نسبتا کم (هزینه سوخت کم)
- ✓ بازده این نیرگاهها بین ۳۰ تا ۴۰ درصد است.
- ✓ با توجه به هزینه کم بهره برداری، جز نیروگاههای base load هستند.



بخش اول شبکه قدرت–تولید انرژی در نیروگاه ها

نمای ساده نیروگاه گازی (گاز داغ حاصل از احتراق توربین را می چرخاند)

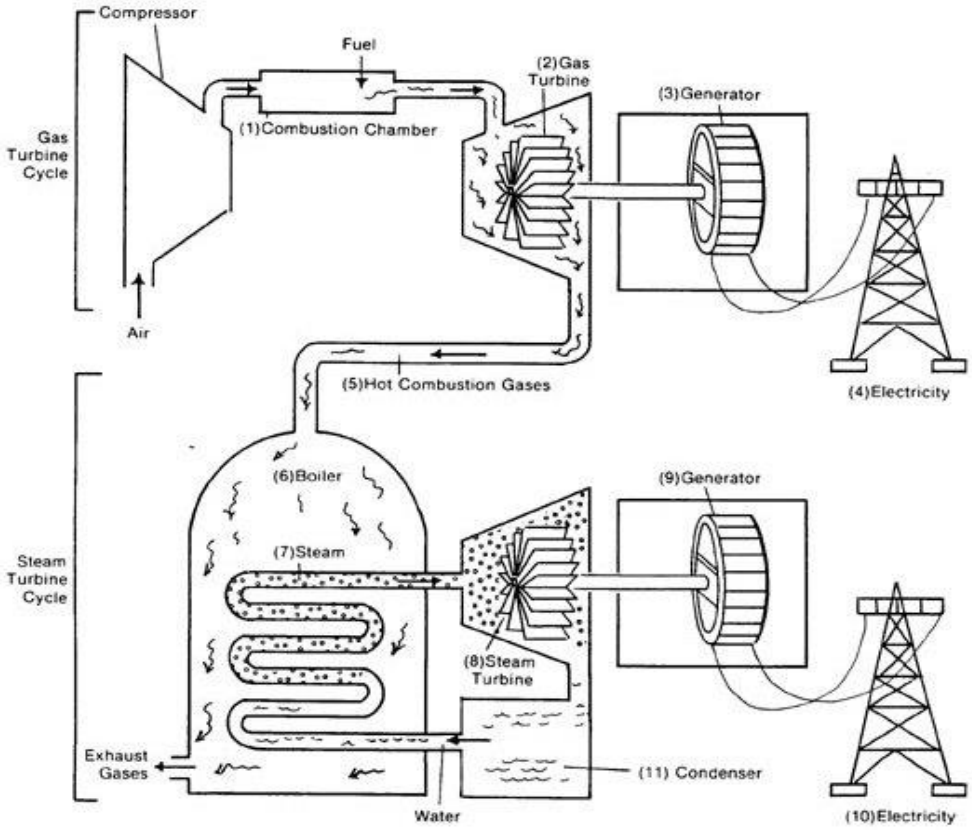
- ✓ مصرف سوخت فسیلی (گاز طبیعی، گازوئیل)
- ✓ هزینه سرمایه گذاری نسبتا کم
- ✓ هزینه بهره برداری نسبتا زیاد
- ✓ بازده این نیرگاهها بین ۲۵ تا ۳۵ درصد است.
- ✓ با توجه به هزینه بالای بهره برداری، جز نیروگاههای peak load هستند.
- ✓ زمان ساخت، نسبتا کم



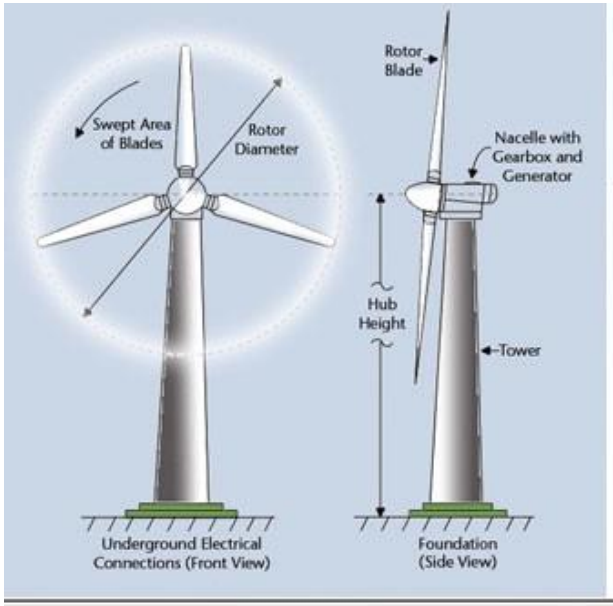
بخش اول شبکه قدرت–تولید انرژی در نیروگاه ها

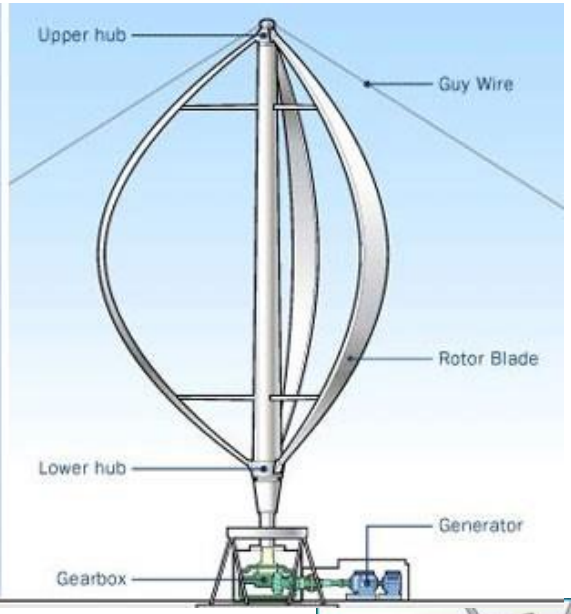
نیروگاههای سیکل ترکیبی:

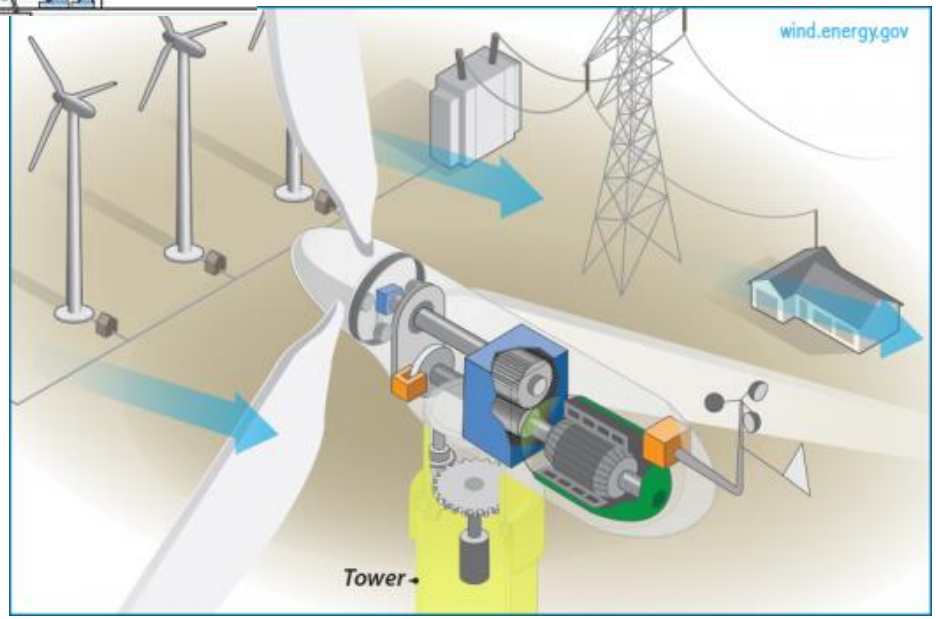
- ✓ **نیروگاه گازی زمان ساخت و هزینه ساخت نسبتا کمی دارند؛ اما مشکل اصلی آنها هزینه بهره برداری بالا است؛ از اینرو بهتر است به صورت سیکل ترکیبی استفاده شوند تا بازده آنها افزایش یابد.**
- ✓ **در نیروگاه های سیکل ترکیبی، از گاز خروجی داغ واحدهای گازی به عنوان انرژی حرارتی ورودی واحدهای بخار استفاده می شود (معمولاً، هر دو واحد گازی می توانند یک واحد بخار با همان اندازه را بدون نیاز به سوخت اضافه تغذیه کنند).**
- ✓ **بازده این نیرگاهها بین ۴۰ تا ۵۰ درصد است.**
- ✓ **جز نیروگاههای base load هستند.**
- ✓ **بهتر است نیروگاههای گازی تبدیل به سیکل ترکیبی شوند**



انرژی های تجدیدپذیر (بادی)

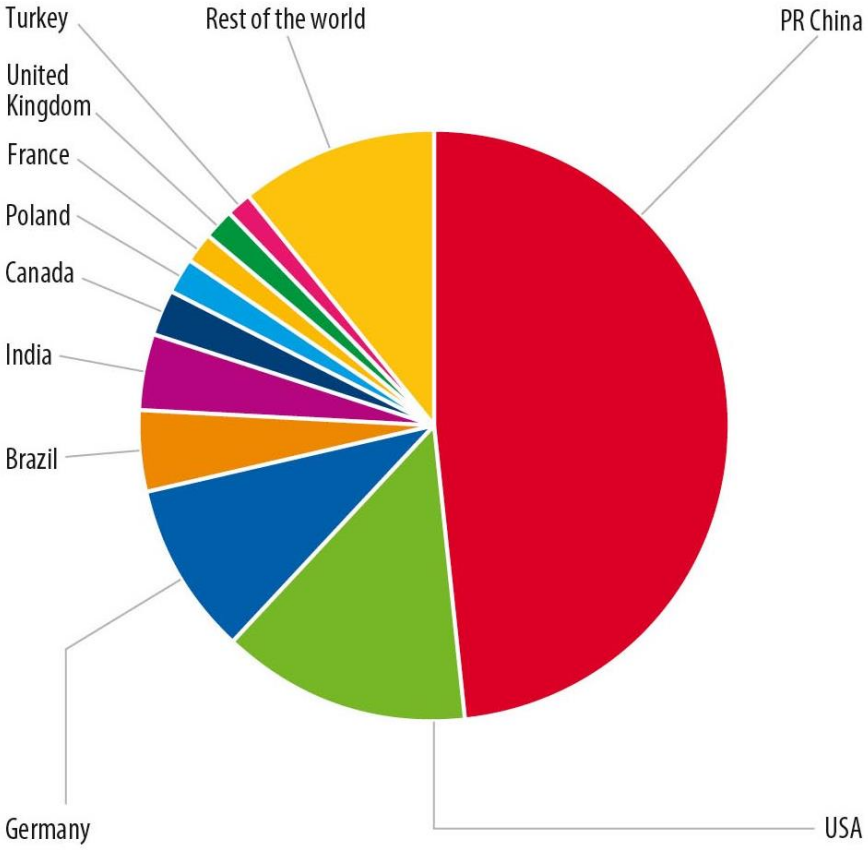






توسعه انرژی های تجدیدپذیر در جهان (بادی)

۱۰ کشور برتر در زمینه نصب توربین‌های بادی در سال ۲۰۱۵

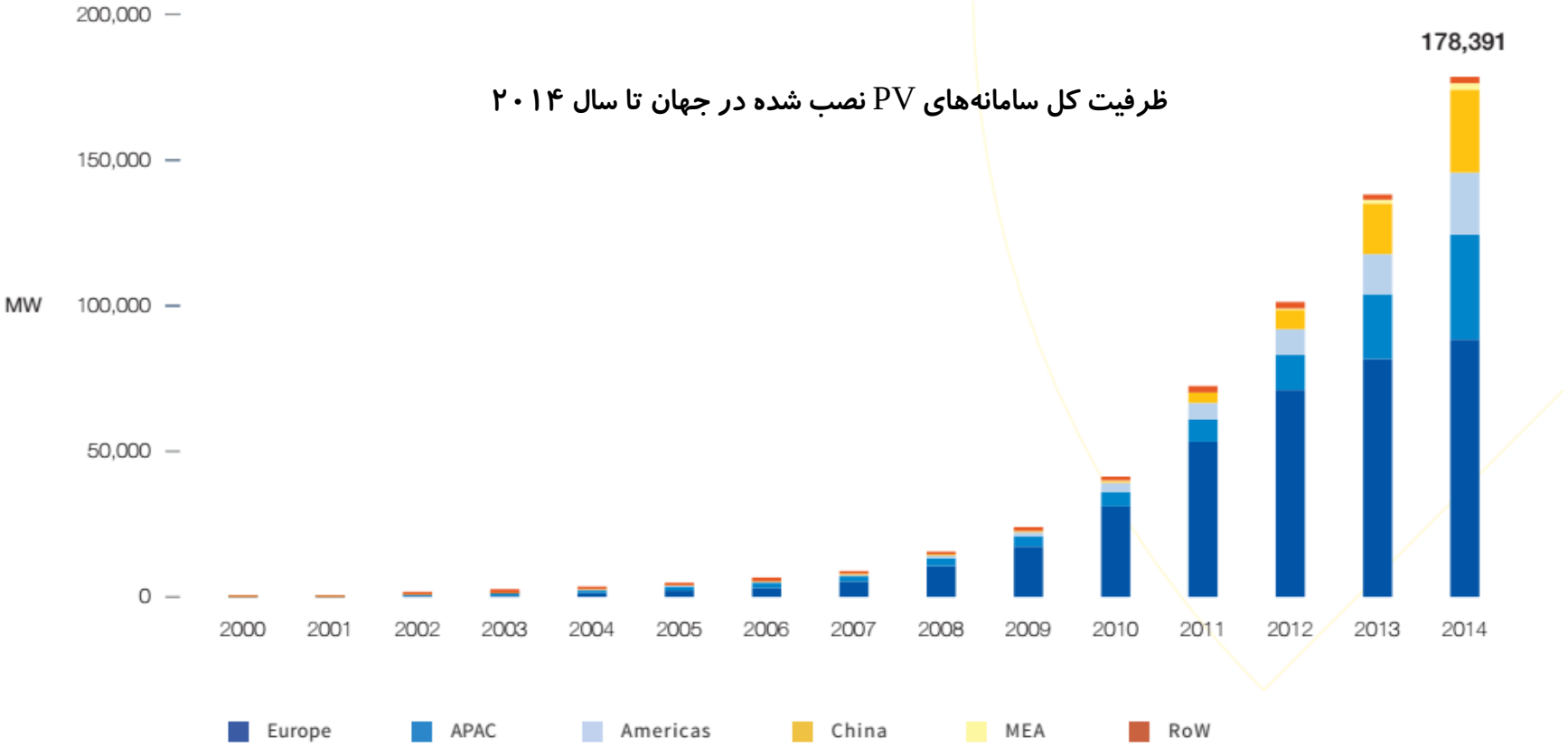


Country	MW	% Share
PR China	30,753	48.5
USA	8,598	13.5
Germany	6,013	9.5
Brazil	2,754	4.3
India	2,623	4.1
Canada	1,506	2.4
Poland	1,266	2.0
France	1,073	1.7
United Kingdom	975	1.5
Turkey	956	1.5
Rest of the world	6,950	11.0
Total TOP 10	**56,517**	**89**
World Total	**63,467**	**100**

Source: GWEC

توسعه انرژی های تجدیدپذیر در جهان (فتوولتائیک)

ظرفیت کل سامانه‌های PV نصب شده در جهان تا سال ۲۰۱۴

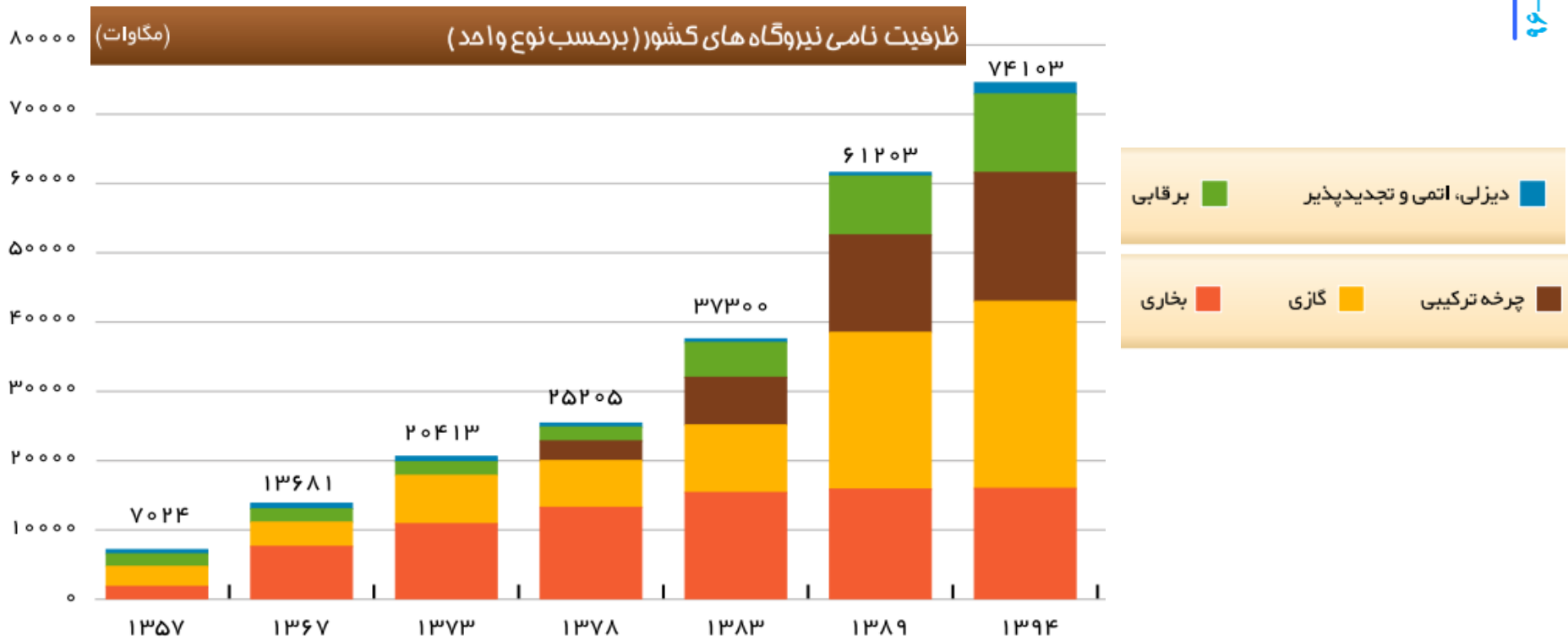


APAC: Countries of the Asia-Pacific Region MEA:Middle East

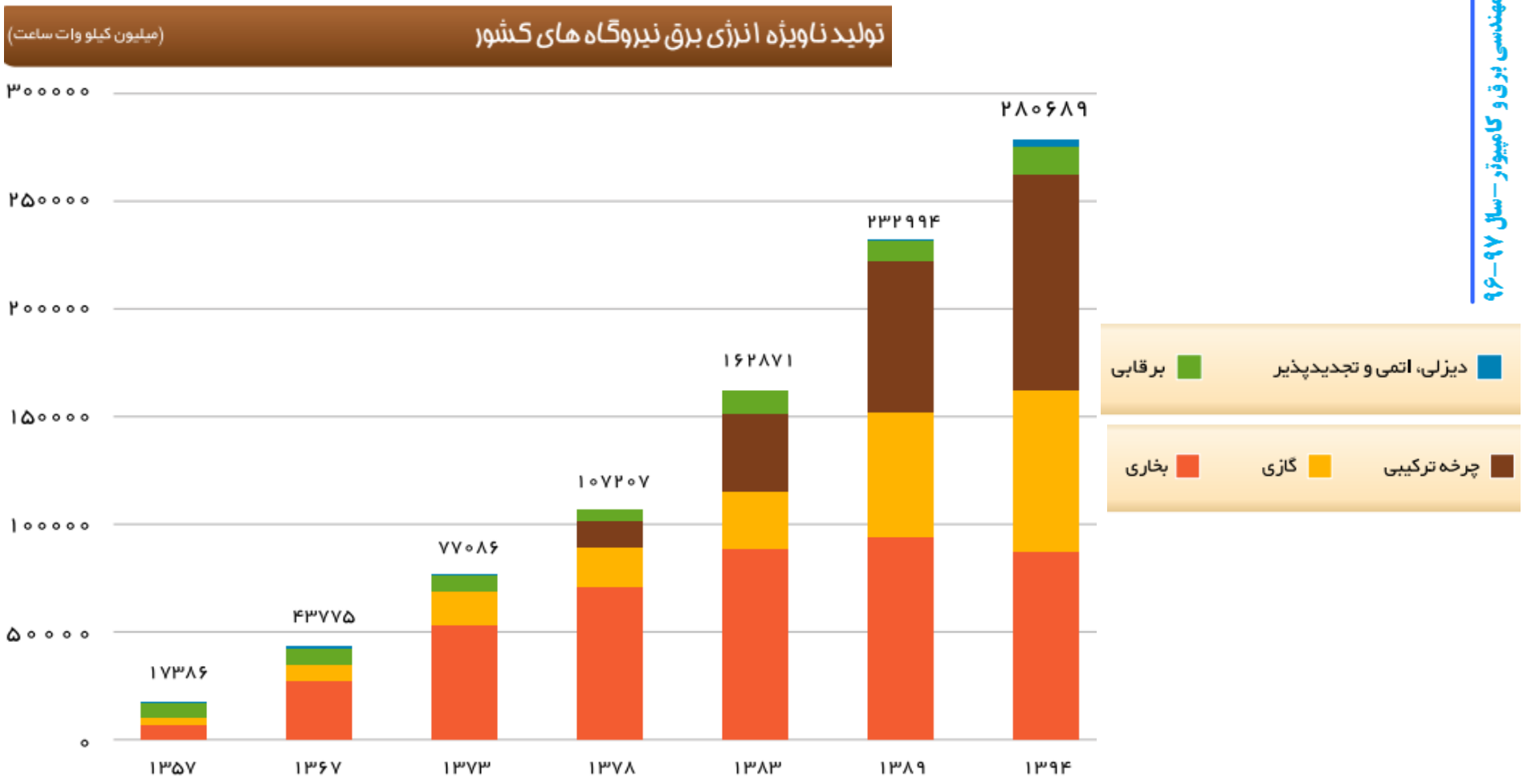
بخش اول شبکه قدرت–تولید انرژی در نیروگاه ها (وضعیت ایران)

خلاصه وضعیت صنعت برق

شرح	واحد	در پایان سال های							متوسط رشد سالانه ۹۴ به ۵۷
		۱۳۹۴	۱۳۸۹	۱۳۸۳	۱۳۷۸	۱۳۷۳	۱۳۶۷	۱۳۵۷	
قدرت نامی نیروگاه ها	مگاوات	۷۴۱۰۳	۶۱۲۰۳	۳۷۳۰۰	۲۵۲۰۵	۲۰۴۱۳	۱۳۶۸۱	۷۰۲۴	۶/۶
میانگین قدرت عملی نیروگاه ها	مگاوات	۶۴۷۰۷	۵۴۰۶۹	۳۳۸۰۱	۲۳۹۹۰	۱۹۳۲۶	۱۱۷۳۴	۶۳۶۲	۶/۵



بخش اول شبکه قدرت–تولید انرژی در نیروگاه ها (وضعیت ایران)



این شکل را نسبت به شکل اسلاید قبل تفسیر کنید

بخش دوم شبکه قدرت–شبکه های ارتباطی بین تولید و مصرف برق

شبکه ارتباطی (تقسیم بندی سطح ولتاژی):		
شبکه انتقال	شبکه فوق توزیع	شبکه توزیع

به طور کلی شامل دو بخش:	
پست های برق (افزاینده، کاهنده، سوئیچینگ یا کلیدزنی)	خطوط (هوایی، زمینی)

- **پستهای افزاینده (Step-up):**

پس از تولید برق با ژنراتور، جهت کاهش تلفات و امکان انتقال توانهای بالا به سایر نقاط، بایستی ولتاژ خروجی ژنراتور (که معمولا کمتر از ۲۰ کیلوولت است) را به ولتاژ سطوح انتقال (۲۳۰ یا ۴۰۰ کیلوولت) تبدیل نمود.

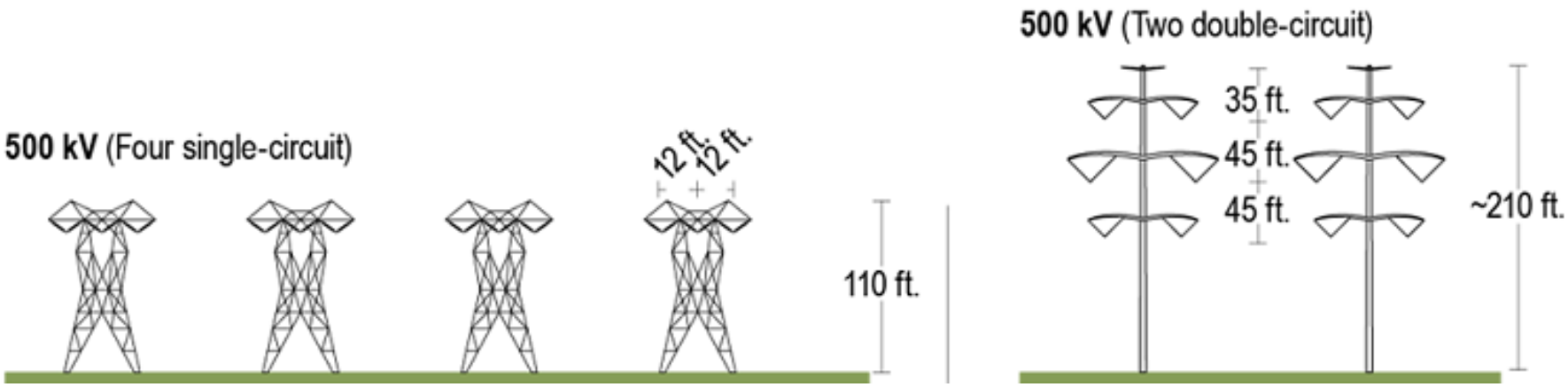
- **پستهای کاهنده (Step-down):**

با نزدیکی به محل مصرف، بایستی سطح ولتاژ را کاهش داد که معمولا در چند مرحله (مثلا توسط پستهای انتقال ۴۰۰/۶۳ ،فوق توزیع ۶۳/۲۰ و توزیع ۲۰/.۴ کیلوولت) انجام می شود.

- **پست سوئیچینگ**

بخش دوم شبکه قدرت–شبکه های ارتباطی بین تولید و مصرف

خطوط انتقال: – خطوط هوایی معمولی – خطوط هوایی فشرده – خطوط زمینی یا کابلی



❖انتقال به صورت AC (بسیار رایج) یا DC (در سطوح خیلی بالا: HVDC)

❖وضعیت ایران (۹ سطح ولتاژ AC داریم):

✓شبکه انتقال ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت

✓شبکه فوق توزیع (۶۶) ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت

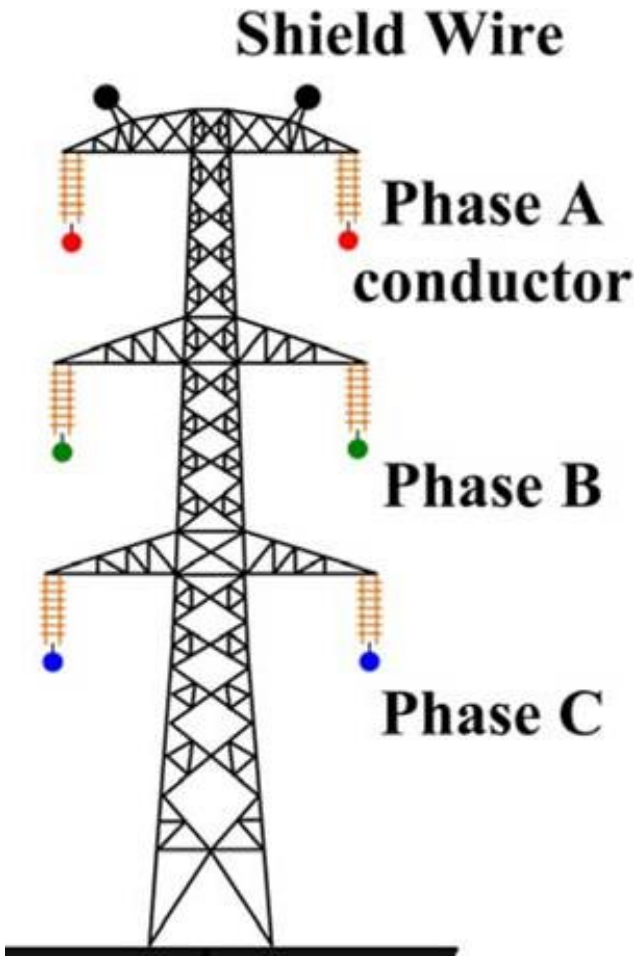
✓شبکه توزیع ۰/۴، ۱۱، ۲۰ و ۳۳ کیلوولت

ولتاژ ۶۶ کیلو ولت بجای ۶۳ کیلو ولت در استان فارس

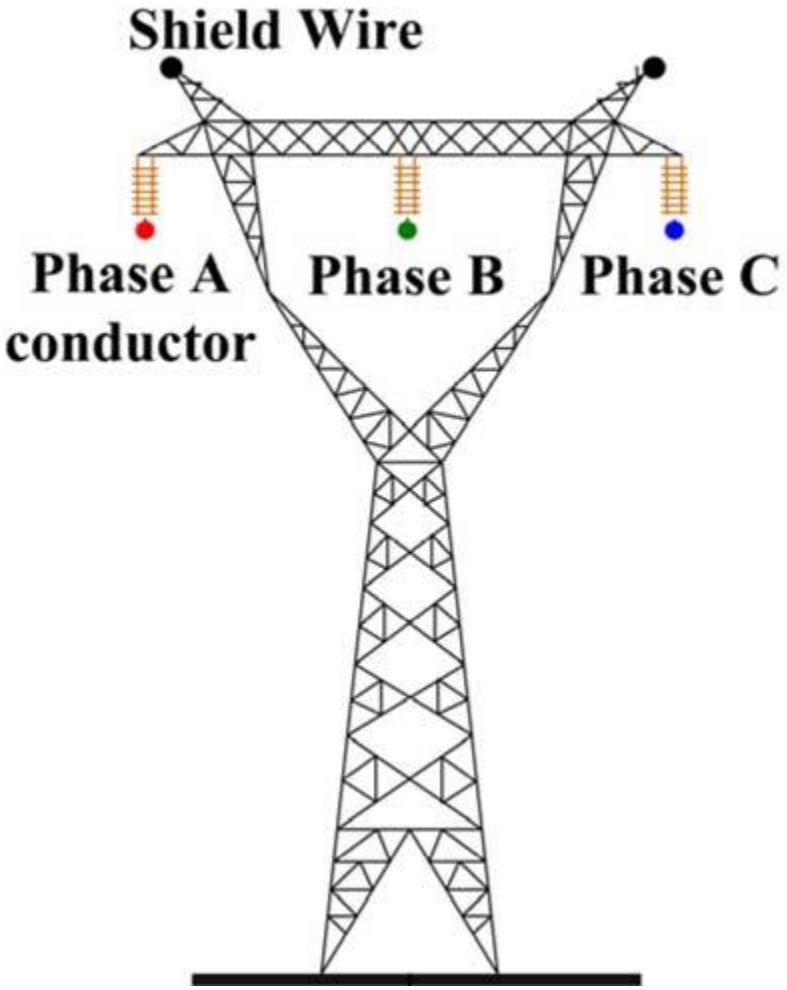
۱۱ کیلو ولت در استان های خوزستان و فارس و سیستان و بلوچستان

۳۳ کیلو ولت در استان خوزستان

❖سطوح ۷۶۵ و بالاتر در آمریکا، کانادا، برزیل، هند و ...



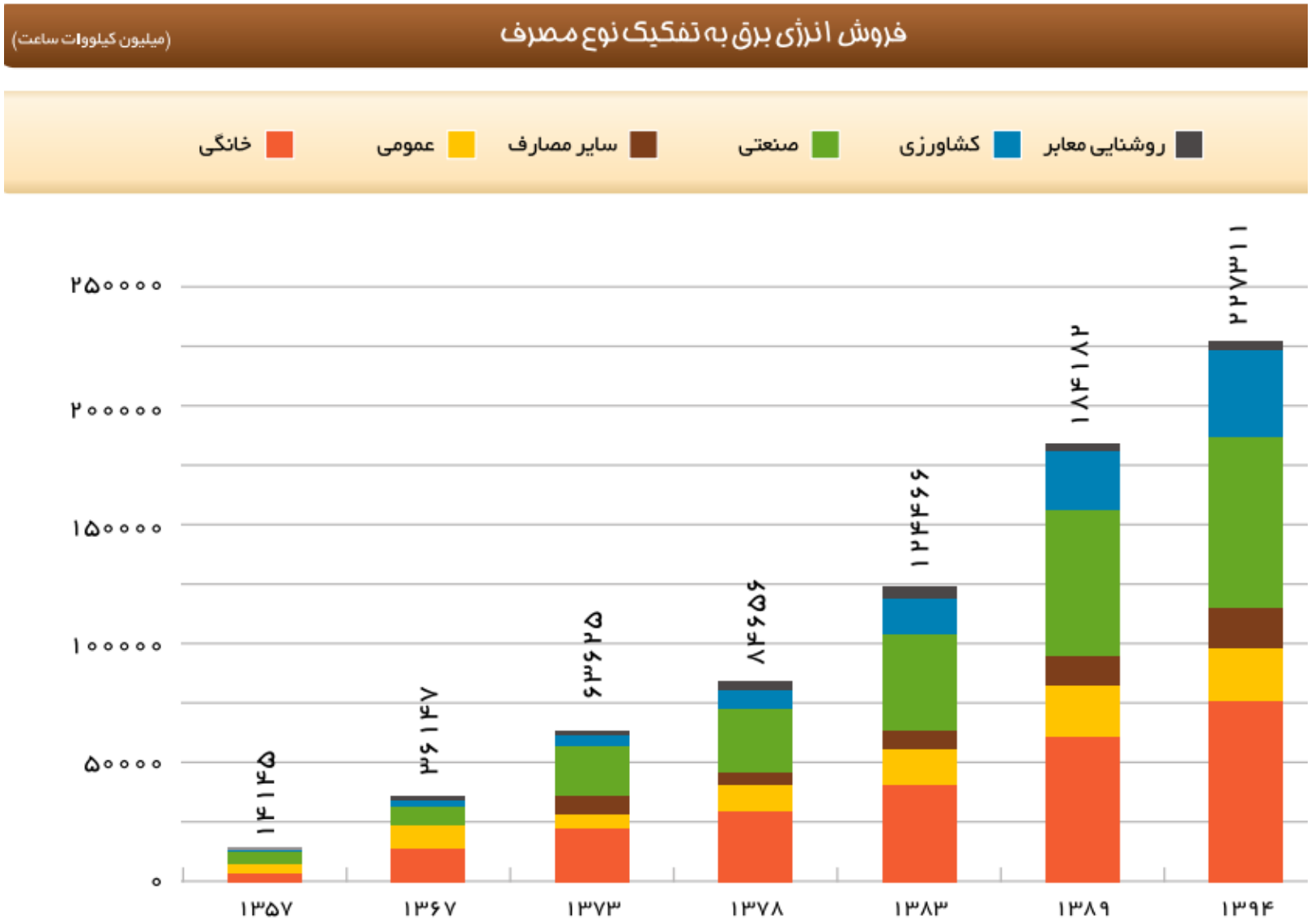
نمونه ای از خط AC دو مداره



نمونه ای از خط AC سه فاز تک مداره

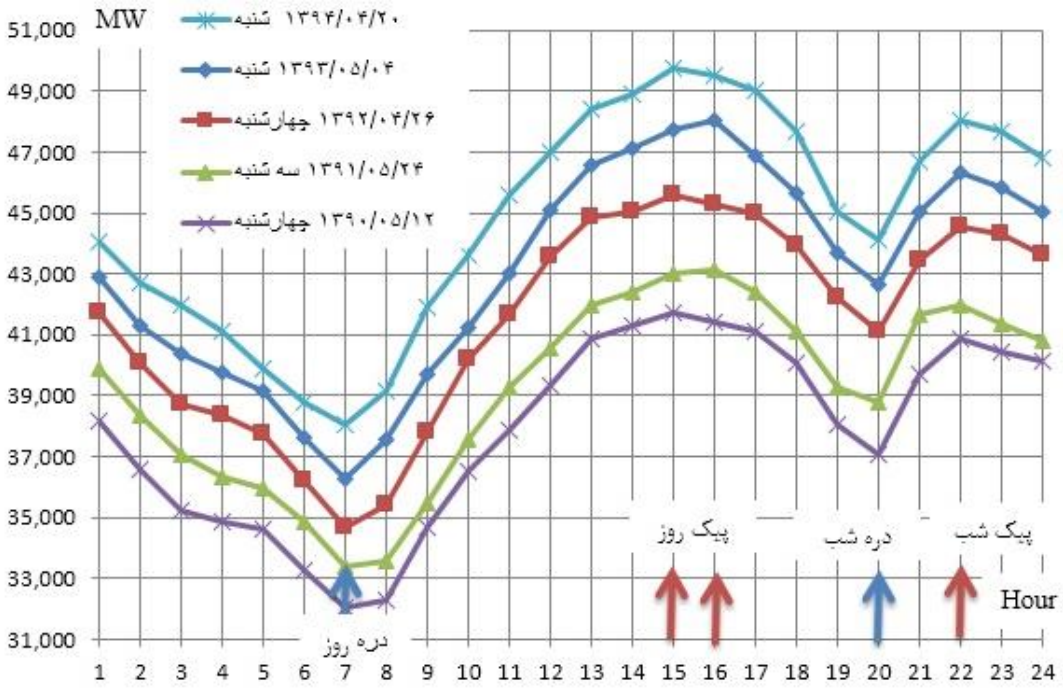
نمونه ای از خط DC ۵۰۰ کیلوولت:

در هر بخش مثبت و منفی، ۲ هادی استفاده شده (دوباندله)


فروش انرژی برق به تفکیک نوع مصرف
(میلیون کیلووات ساعت)
روشنایی معابر
کشاورزی
صنعتی
سایر مصارف
عمومی
خانگی
۲۵۰۰۰۰
۲۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۰۰
۱۰۰۰۰۰
۵۰۰۰۰
۰
۱۴۱۴۵
۳۶۱۴۷
۶۳۶۲۵
۸۴۶۵۷
۱۲۴۴۶۶
۱۸۴۱۸۲
۲۲۷۳۱۱
۱۳۵۷
۱۳۶۷
۱۳۷۳
۱۳۷۸
۱۳۸۳
۱۳۸۹
۱۳۹۴

بخش سوم شبکه قدرت–مصرف (وضعیت ایران)

منحنی بار روزانه در چند روز نمونه در ایران:



تعریف ضریب بار (Load Factor):

$$= \frac{Average\ Load}{Maximum\ Load\ in\ given\ time\ period}$$

این ضریب بین صفر و یک است و هرچه به یک نزدیک باشد، مطلوب تر است