Elektrik Enerjisi Üretimi

Yrd.Doç. Dr. Selim TRABULUS

DEFTER NOTU

27.09.2011

DERSİN İŞLENİŞİ VE GENEL BİLGİLER

* İki vize + bir final + bir ödev (isteğe bağlı).
* Devam zorunluluğu yok.

Ödev;
- Tez formatında yazılmalı,
- 3 kişilik gruplar halinde hazırlanmalı,
- Özgün bir konu üzerine 25-30 sayfa hazırlanabilir. Bazı konu önerileri şöyle;
  + Şalt tesisi türleri vs.
  + Kesici - ayırıcı sistemleri,
  + Topraklayıcı sistemleri,
  + Açma-kapama elemanı türleri ve işlevleri gibi.
- Derleme, çeviri veya proje olabilir,
- Elektronik formatlarda kaydedilmeli (CD üzerine vs),
- Giriş, gelişme ve sonuç bölümlerini içermeli,
- Faydalanılan kaynaklar belirtilmeli,
- Birinci vizeye kadar A4 formatında "ödev planı" teslim edilmeli,
- Ödevler final sınavı esnasında toplanacak,
- Ödevi kabul edilenlerin notu bir birim (ör: C → C+), bazı durumlarda iki birim yükseltilmekte.

* Başarı (geçme) oranı yüksek ama eğri (curve) da öyle. 50 → C-, 95 → A
* Kaynak kitap: Elektrik Enerjisi Üretim Santralleri
  (Behcet Kocaman, Birsen Yayınevi)

* Resmi web sitesi: www.enerji.gov.tr

* Hocanın web sitesi: www.yorbis.yildiz.edu.tr/trablus

tinyurl.com/7sgnxtd

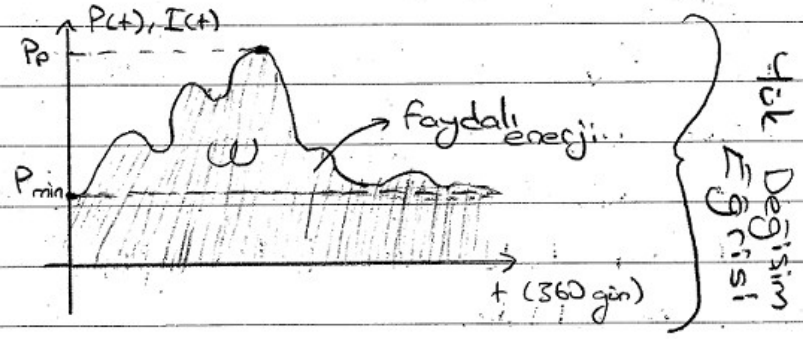
morning glory

KONULAR (İÇERİK)

- Elektrik enerjisi üretimine giriş (temel prensip ve kavramlar),
- Elektrik santrallerinin sınıflandırılması,
  - + Hidro-elektrik santrali (HES)
  - + Buhar santrali
  - + Gaz santrali

  } Prensip şemaları, çalışma şekilleri ve dezavantajları

- Elektrik enerjisi ekonomisi ile ilgili bilgiler,
  - + Düzenlenmiş (tertiplenmiş) yük eğrisi;



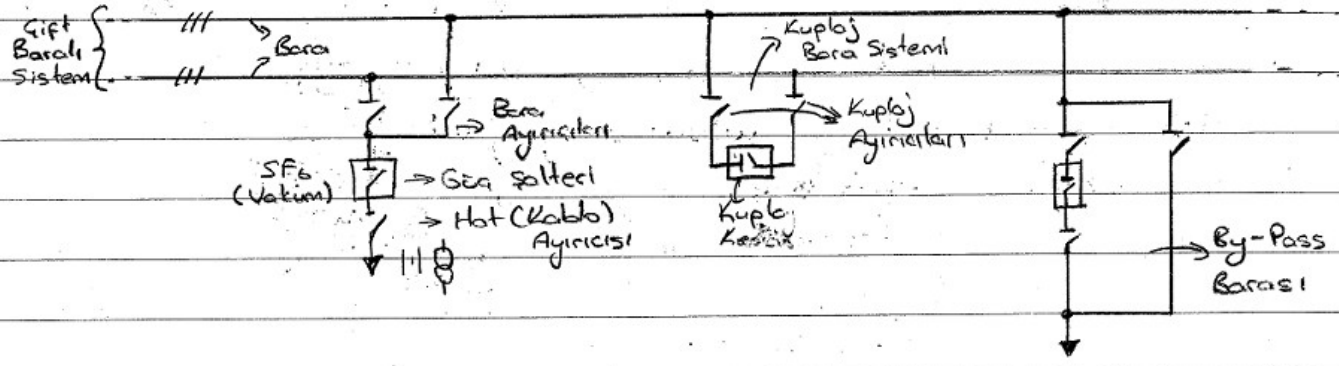
$$W = \int_0^{+} P(t) \cdot d(t)$$

$$= I^2 \cdot R$$

$$P = V \cdot I = I_T^2 \cdot R_T$$

  - + Santral gücü hesabı,
  - + Santral gerilimi, grup sayısı ve makine gücü.
  - + 1 kwh enerjinin santrale maliyeti,
  - + Santralde kullanılan yakıt için maliyet hesaplanması,
  - + Enerji maliyeti bakımından santrallerin karşılaştırılması.

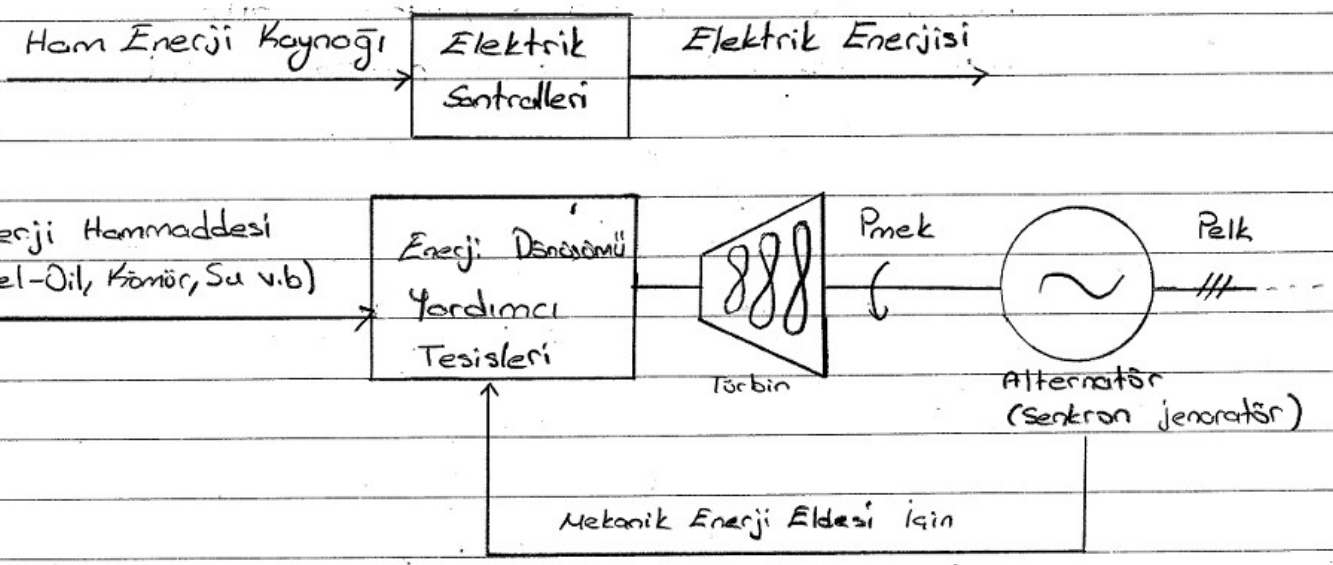
- Teşmik santrallerde ekonomik işletme ve optimal yük dağılımı.
- Şalt tesisi konfigürasyonu;



morning glory

04.10.2011

Elektrik santrallerinde hâm enerji kaynakları (su, kömür, akaryakıt, doğalgaz, güneş, rüzgar, uranyum) kullanılarak elektrik enerjisi üretilmektedir.



Elektrik santrallerinde alternatör (jeneratör) türbin dönüşümü tarafından tahrik edilmektedir. Santral türleri de türbin türlerine göre sınıflandırılabilirler (buhar santrali, gaz santrali, su santrali, rüzgar santrali v.b)

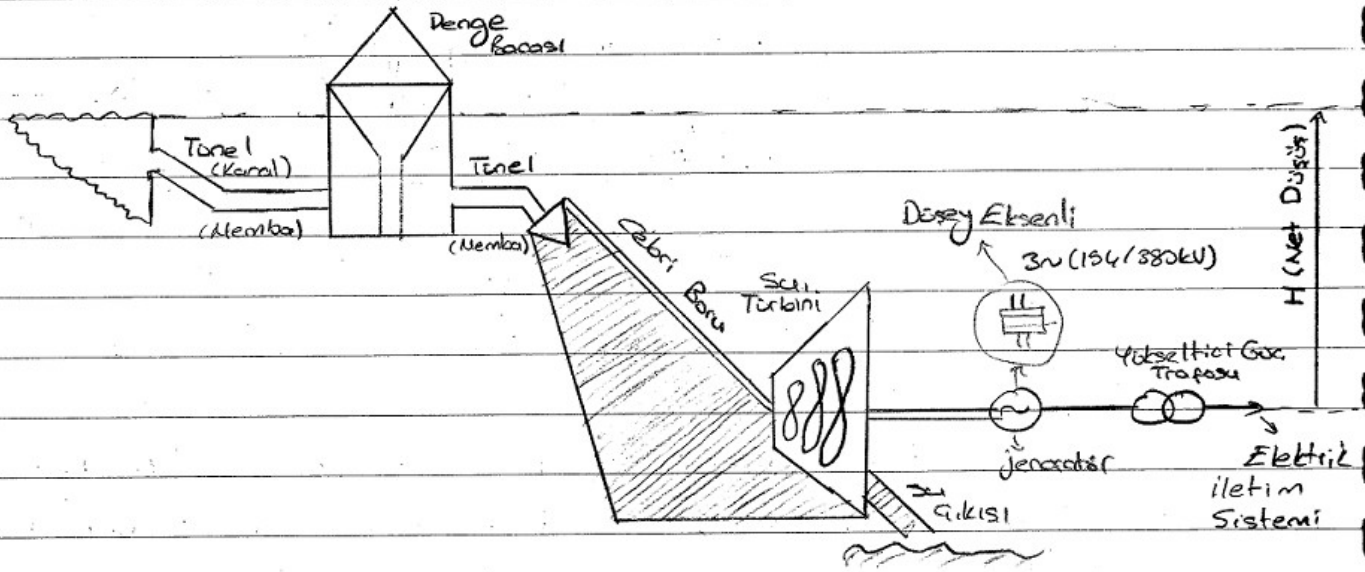
Elektrik Santrallerinin Hammadde Türüne Göre Sınıflandırılması

1) Su Santralleri ⇒ Su Türbini
2) Termik Santraller
a) Kömür veya Fuel-Oil ⇒ Buhar Türbini
b) Jeotermal ⇒ Buhar Türbini
c) Gaz türbinli veya
Kombine Çevrim Santralleri ⇒ Gaz veya Buhar + Gaz Türbini
3) Nükleer Santraller ⇒ Buhar Türbini
4) Güneş Enerji Santralleri ⇒ Buhar Türbini
5) Rüzgar Santralleri ⇒ Rüzgar Türbini

morning glory

HİDROELEKTRİK SANTRALLERİ

Suyun potansiyel enerjisinin, belli bir yükseklikten bırakılarak kinetik enerjiye çevrilmesi ve su türbinleriyle mekanik enerjiye dönüştürülen bu kinetik enerjiden son olarak alternatör (jeneratör) yardımıyla elektrik enerjisi üretilmesi prensibine dayanan santrallerdir.



Barajlar genel olarak vadilerin kapatılması suretiyle yapılan, 15 m'den yüksek, su depolayan yapay yapılardır. Su kuvveti mevsim şartlarına göre değiştiği için baraj kurulacak su bir gölde biriktirilir. Biriktirilen su uygun bir yükseklik farkı oluşturularak kontrollü bir biçimde bir düzene sokularak türbinden geçirilir. Böylece oluşturulan mekanik enerji bir alternatör (jeneratör) vasıtasıyla elektrik enerjisine çevrilir.

Cebri Borusu: Türbin ile türbin membaı (yani ilk açık su yüzeyi) arasındaki basınçlı borulara "cebri borusu" denir.

İlk açık su yüzeyi baraj veya denge bacası kısmında olabilir.

Genel olarak çelikten yapılırlar ancak basıncın düşük olduğu uygulamalarda beton malzemeler de kullanılabilir.

En kısa yoldan santrale indirilmelidir. Eğer cebri boru boyu uzun tutulursa hem maliyet hem "düşüm kaybı" (enerji kaybı) artar.

morning glory

Santral tasarımına göre bir veya birkaç tane kullanılabilirler. Tek veya çoklu borular seçilirken, taşıma ve montaj güçlüğüyle birlikte stabilite sorunu da göz önüne alınmalıdır.

Örneğin: Çaykoy HES

Uzunluk : 800m
İç Çap : 1,4 km
Hız : 3~5 m/s
Kalınlık : 18-22 mm

2,65 mm'lik çap → 10 mm et kalınlığı
→ Çekme gerilmesi 780 kg/cm²

Denge Bacası: Basınçlı boru sistemlerindeki basınç değişimlerini düzenleyerek cebri boruların en ekonomik boyutlarda (boy, çap ve et kalınlığı) kalmalarını ve iyi bir regülasyonla türbinlerin düzenli ve verimli çalışmalarını sağlar. Yüksek düşümlü veya cebri boru boyu uzun olan santrallerde tercih edilirler.

-Avantajları

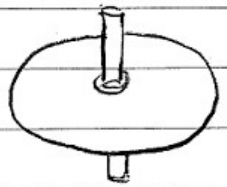
Bir hidroelektrik santralinde, elektrik şebekesindeki arızada veya şebekedeki yük azalmasında cebri boru içinde hareket eden su yavaşlar. Belli bir ivmeye sahip olan su kütlesi cebri boruların alt uçlarında büyük basınç artışlarına sebep olur. Buna "su darbesi" denir. Bu durumda basınç artışı cebri borada dalgalar halinde membaya doğru ilerler. Denge bacası ise bu basınç dalgalarını kesecek membaş kısmında aşırı basınç yükselmesini engeller.

Türbinde regülasyonu sağlar. Türbin çalışmaya başlarken ("yol alma" sırasında) veya çalışırken ani yük artışı durumunda türbinin fazla suya gereksinimi artar. Su kütlesinde yeterli ivme sağlanmazsa çok eğimli cebri boru ile türbin birleştiği yerdeki su akımında eksiklikler olacaktır.

morning glory

Türbin: Su türbinlerinde suyun akış hızının çok yüksek olmaması nedeniyle jeneratörün senkron hızı düşük fakat çift kutup sayısı (p) yüksektir. Bu makinelerde rotor çapı boyuna göre büyüktür.

Su hızı düşük olduğu için türbin ve jeneratör düşey eksenli yerleştirilir. (Daha iyi bir merkezkaç kuvveti dengelemesi ve dönüş verimi sağlar.) Ayrıca düşey montajlı tasarım yer tasarrufu sağlar ve havalandırma verimini artırır.

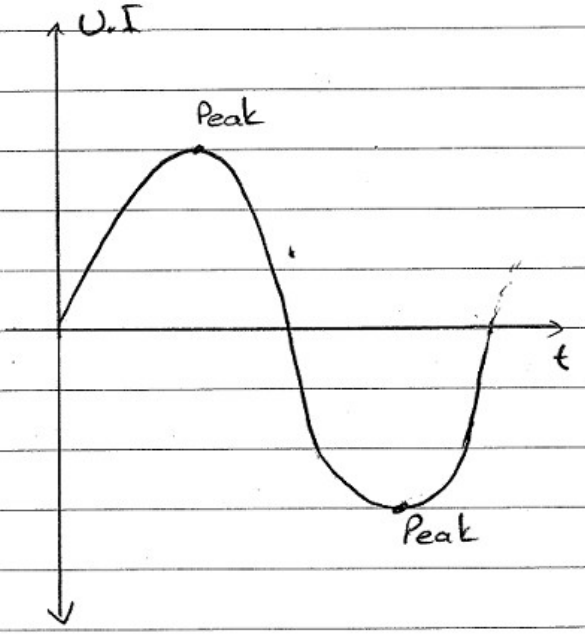


Senkron HES:

$n_s = 187,5$ dev/dk

$2p = 32$

$n_s = \frac{60.f}{p}$ (p: Çift Kutup Sayısı)



Not: Senkron alternatörlerin kullanılma sebebi: Endüvi endüktörün manyetik dönüşleri senkrondur, asenkrondaki gibi "kayma" yoktur. (%1-2 gibi ihmal edilebilir bir değer dışında) Böylece "peak" anlarında uygun geçimler olur ve kayma sorunu yaşanmaz. Düzgün bir sinüzoidal form elde edilince de "frekans kontrolü" asenkron makineye göre çok daha kolay gerçekleştirilir.

11.10.2011

Kepez hidroelektrik santrali;

- Kurulu Güç: 3x8.8 Mw
- Net Güç: 162 Mw
- Nominal Hız: 750 dev/dk
- Beton Tünel Uzunluğu: 653 m
- Beton Tünel Çapı: 2,5 m
- Denge Barası Yüksekliği: 47,55 m
- Denge Barası Çapı: 5m-12m
- Cebri Boru Uzunluğu: 758 m
- Cebri Boru Çapı: 2,4m-2,25m

Bazı genel bilgiler;

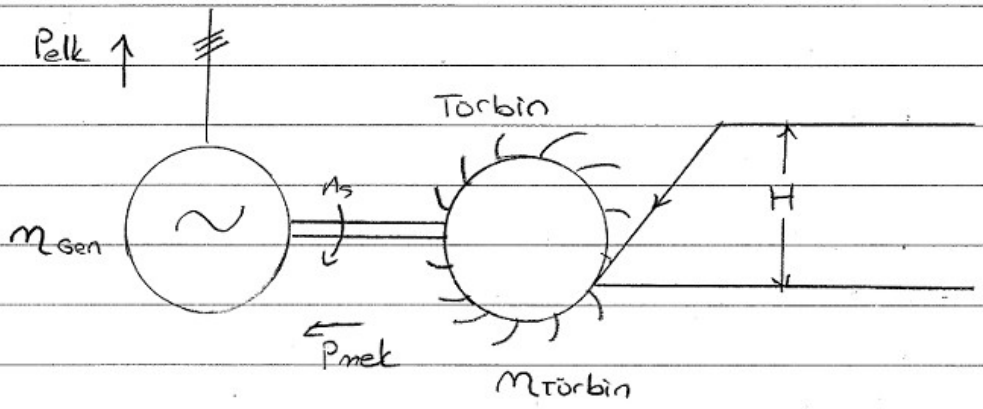
+ Türkiye çapında 172 adet HES mevcut.
+ Kurulu güç: 13700 Mw
+ Ekonomik su potansiyeli: %35
+ Verim: %90 ve üzeri
+ Yatırım geri ödeme süresi: 4-10 yıl
+ İşletme gideri düşüktür (~0,2 cent/kwh)

morning glory

Santrallerin Kurulum Maliyetleri ($/kw)

+ Hidroelektrik : 750-1200
+ Linyite dayalı termik santral: 1600
+ İthal kömüre dayalı termik santral : 1450
+ Doğal gaza dayalı termik santral : 680
+ Nükleer santral : 3500
+ Petrole dayal termik santral: 2000
+ Rüzgar santrali : 750

Hidroelektrik Gücün Hesaplanması



- Düşü
- Debi
- Cihaz (Ekipman) Verimi

} Etkileyen Faktörler

morning glory

H yüksekliğinde, m kütlesindeki suyun "g" yerçekimi ivmesiyle yaptığı iş;

$$E_{potansiyel} = m \cdot g \cdot H \quad = kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m = N.m = w.saat = joule$$

m: kütle [kg], g: yerçekimi ivmesi $\left[9{,}81 \frac{m}{s^2}\right]$, H: düşü [m], Newton

$$P_{su} = \frac{E}{t} = \frac{m \cdot g \cdot H}{t}$$

$m = \rho \cdot V$ (ρ: suyun yoğunluğu $\left[1000 \frac{kg}{m^3}\right]$, V: suyun hacmi $[m^3]$)

$$P_{su} = \frac{\rho \cdot g \cdot V \cdot H}{t}$$

$t \rightarrow$ Debi $Q = \frac{m^3}{s \rightarrow saniye}$

$$P_{su} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \ [Watt]$$

$$P_{su} = 1000 \cdot \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot (9{,}81) \cdot \left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot Q \cdot H(m)$$

$$= \underbrace{kg \cdot \frac{m}{s^2}}_{N} \cdot \frac{m}{s} = \frac{N.m}{s} = \frac{joule}{s} = \frac{w.s}{s} = Watt$$

$$P_{su} = (9{,}81) \cdot Q \cdot H \ [kw]$$

→ Santralin Potansiyel Su Gücü

morning glory

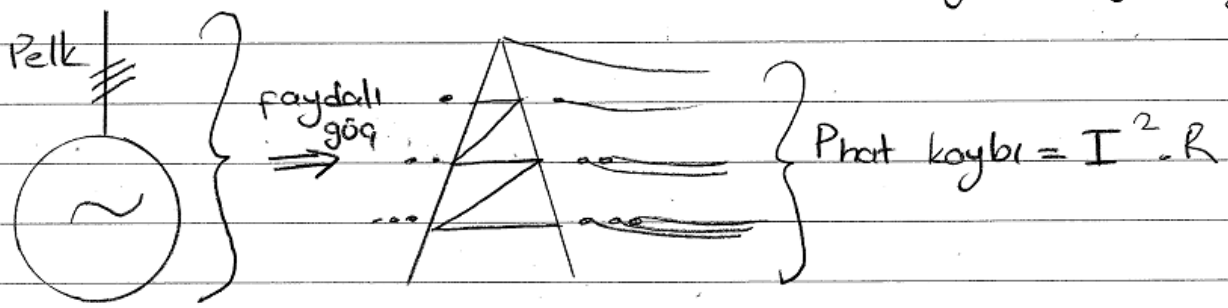
"Verim" göz önüne alınırsa;

$\eta_t \rightarrow$ Türbin Verimi $\rightarrow \frac{P_{mek}}{P_{su}}$ | Potansiyel su gücünün ne kadarı türbinde mekanik güce çevrilir

$\eta_g \rightarrow$ Jeneratör Verimi $\rightarrow \frac{P_{elk}}{P_{mek}}$ | Türbin çıkışındaki mekanik gücün ne kadarı elektrik gücüne çevrilir

$P_{elk} = \eta_t \cdot \eta_g \cdot P_{su} = \eta_T \cdot P_{su}$ (Toplam Verim)

→ Verimler göz önüne alındığında alternatör çıkışındaki elektriksel güç (faydalı güç)



Örnek: 4 x 40 Mw gücündeki bir hidroelektrik santral için; H = 90 m, türbin verimi = %91 ve jeneratör verimi = %97 ise her bir ünitenin tam yük debisini bulunuz

(η_t = %91, η_g = %97, H = 90 m, 4 x 40 Mw)

40 Mw = 40.000 kW → Bir ünitenin gücü

$P_{elk} = (9,81) \cdot H \cdot Q \cdot \eta_{t \cdot g}$ [kw]

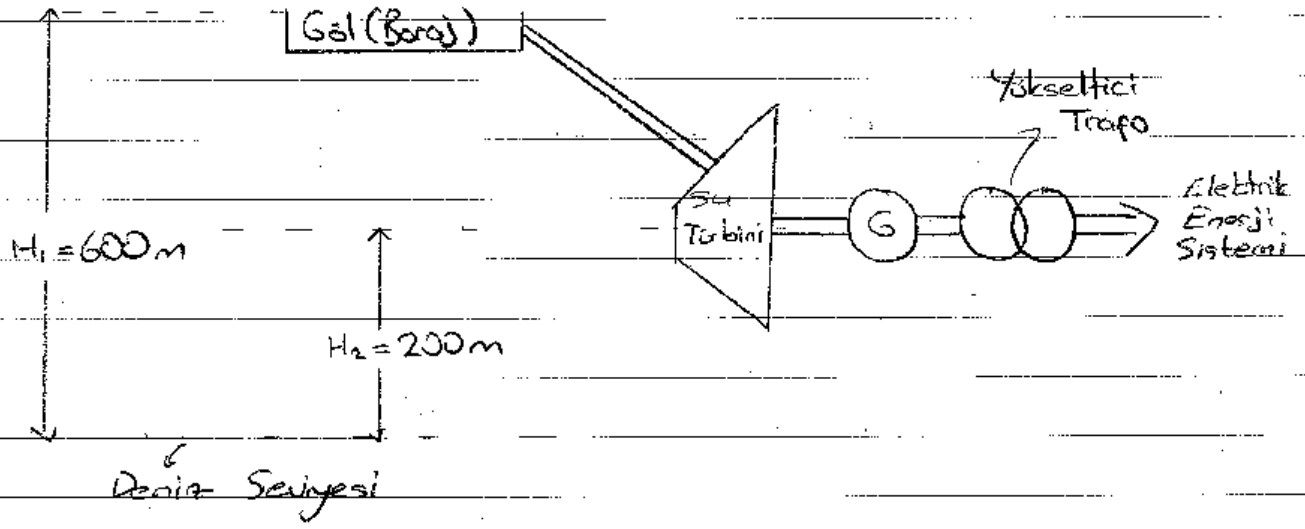
$40000 = (9,81) \cdot 90 \cdot Q \cdot (0,91) \cdot (0,97)$ ise;

$Q \cong 51,32 \ m^3/s$ → Bir yük için tam yük debisi

morning glory

Örnek / Bir hidroelektrik santral için deniz seviyesinden ortalama 600m yükseklikte bir baraj oluşturulacaktır. Bu barajda bir yılda toplanan suyun hacmi (V) $750.000 \times 10^3\ m^3$'dür. Kurulacak santralin deniz seviyesinden ortalama yüksekliği (H_1) 200 m'dir. Santralde düşü verimi (η_h) %85, türbin verimi (η_t) %75 ve jeneratör verimi (η_g) %95'tir.

Buna göre bu santralde bir yılda üretilebilecek elektrik enerjisi miktarını hesaplayınız.



$H_1 = 600m$

$H_2 = 200m$

$V = 750.000 \times 10^3\ m^3$

$\eta_h = 0,85$ → (Yıllık yağış miktarına bağlı)

$\eta_t = 0,75$

$\eta_g = 0,95$

morning glory

Bir yılda üretilen enerji;

$E = P_{ort} \cdot 8760 \quad [kwh/yıl]$

(P_{ort}: ortalama santral gücü; 8760: 1 yılda (365×24) saat)

$P_{ort} = (9,81) \cdot H \cdot Q_{ort} \cdot \eta_T$

(Q_{ort}: ortalama debi; η_T: Toplam verim)

$$Q = \frac{V \text{ (bir yılda biriken hacim)}}{\underbrace{365 \times 24 \times 3600}_{\text{1 yıl süresince}}} \left[\frac{m^3}{s}\right] = \frac{750.000 \times 10^3}{8760 \times 3600}$$

$$\cong 23,8 \ m^3/s$$

$P_{ort} = (9,81) \cdot H \cdot (23,8)(0,85)(0,95)(0,75)$ $H = H_1 - H_2$

$= (600 - 200)\,m$

$= 400\,m$

$P_{ort} = (9,81) \cdot 400 \cdot (23,8) \cdot (0,85) \cdot (0,95) \cdot (0,75)$

$P_{ort} = P_{elk} = 56560\ kw$

Bir yılda üretilen enerji için;

$E = P_{ort} \cdot 8760$

$= 56560 \cdot 8760$

$= (495,465) \cdot 10^6\ kwh$

$= 495,465\ Gwh$

morning glory

Örnek

Bir hidroelektrik santralin kurulu kapasitesi 6×300 Mw $= 1800$ Mw (Toplam Kurulu Güç), yıllık enerji üretimi 7,5 milyar kwh, nominal düşü 144 m ve toplam verim (η_T) %85 iken;

s.a) Tam kapasitede bu türbinin debisi nedir?
s.b) Yıllık enerji üretimi için kullanılan su miktarı nedir?
s.c) Nehrin yıllık ortalama debisi nedir?

c.a) Psu için türbin debisi;

$$P = (9{,}81).H.Q.\eta_T$$

η_T → Toplam verim

$$Q = \frac{300.000\,[kw]}{(9{,}81).(144).(0{,}85)} \cong 250\ m^3/s$$

→ Tam kapasitede bir türbin için

c.b) $E = P.t = ((9{,}81).Q.H.\eta_T).t$

$$= ((9{,}81).\frac{V}{3600\,t}.H.\eta_T).t$$

V → $[m^3/s]$, t → [saat], t → [saat]

$$\boxed{= (2{,}725).10^{-3}.H.V.\eta_T}$$

→ "H" düşüsünde $V(m^3)$'lük sudan 1 yıl boyunca alınan enerji

$w = (2{,}725).10^{-3}.144.V_{yıl}.(0{,}85) = (7{,}5).10^{9}$ [kwh] ise;

$$\boxed{V_{yıl} = 22{,}5 \text{ milyar } m^3}$$

morning glory

a.c) $Q = \frac{V_{yıl}}{365 \times 24 \times 3600} = \frac{(22,5) \times 10^9}{8760 \times 3600} \simeq 713,5 \ m^3/s$

[saat] [saniye] → Birinci yol

$E = 8760.P \Rightarrow (7,5).10^9 = 8760\,((9,81).144.Q.(0,85))$

ve

$Q \simeq 713,5 \ m^3/s$ → ikinci yol

morning glory

18.10.2011

Örnek / Bir pompa yardımı ile 36 m yüksekliğe (H) su basılacaktır. Suyun debisi (Q) 17,5 kg/s'dir ve pompa üç fazlı asenkron motor ile tahrik edilmektedir. Pompa verimi (η_p) %83, motor verimi (η_m) %85, motor güç katsayısı ($\cos\varphi$) 0,85 ve şebeke gerilimi 380V (faz-faz) ise motor nominal gücünü ve nominal akımı bulunuz. (1kg su = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3)

$H = 36\,m$

$Q = 17,5\,kg/s$

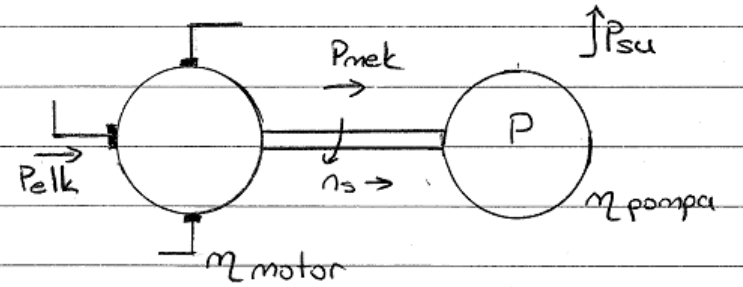
Pompa verimi (η_p) = %83

Motor verimi (η_m) = %85

Motor güç katsayısı ($\cos\varphi$) = 0,85

Şebeke gerilimi = 380 V (faz-faz)

* Standart motor mil güçleri; 5 kw, (7,5) kw, 10 kw, 15 kw ...



$P_{su} = (9,81).Q.H$

$= (9,81).(17,5)10^{-3}.36$

$\cong 6,18\,kw$ → Pompa çıkışındaki güç

$\eta_p = \frac{P_{su}}{P_{mek}} \Rightarrow P_{mek} = \frac{6,18}{0,83} \cong 7,445\,kw$ → Pompa girişindeki (Elk. motor çıkışındaki) güç

Standart Motor Mil Gücünden Seçim Yapılır;

$P_{motor} = 7,5\,kw$

$\eta_{motor} = \frac{P_{mek}}{P_{elk}} = \frac{P_{motor}}{P_{elk}} \Rightarrow P_{elk} = \frac{P_{motor}}{\eta_{motor}} \cong \frac{7,5}{0,85} \cong 8,82\,kw$

$I_n \cong \frac{(8,82).10^3}{\sqrt{3}.(380).(0,85)} \cong 15,77\,A$

morning glory

Hidroelektrik Santrallerinin Avantajları - Dezavantajları

Avantajları;

- Yakıt masrafı yoktur.
- Enerjinin birim maliyeti oldukça düşüktür.
- Santral yedekte kalsa bile kayıplar azdır.
- Yüksek verimlidirler ve verimleri zamanla azalmaz.
- Az sayıda eleman ve ekipman gerektirirler.
- Bakım ücretleri düşüktür. (Dolayısıyla işletme masrafı en düşük santrallerdir.
- Çevreyi kirletmezler, atık sorunları yoktur.
- Tarımsal sulama sistemlerine katkıları vardır, su ürünleri üretimini desteklerler.
- Ömrü uzun santrallerdir.
- Devreye girme süreleri 20-30 dk. arası olup uzun değildir.

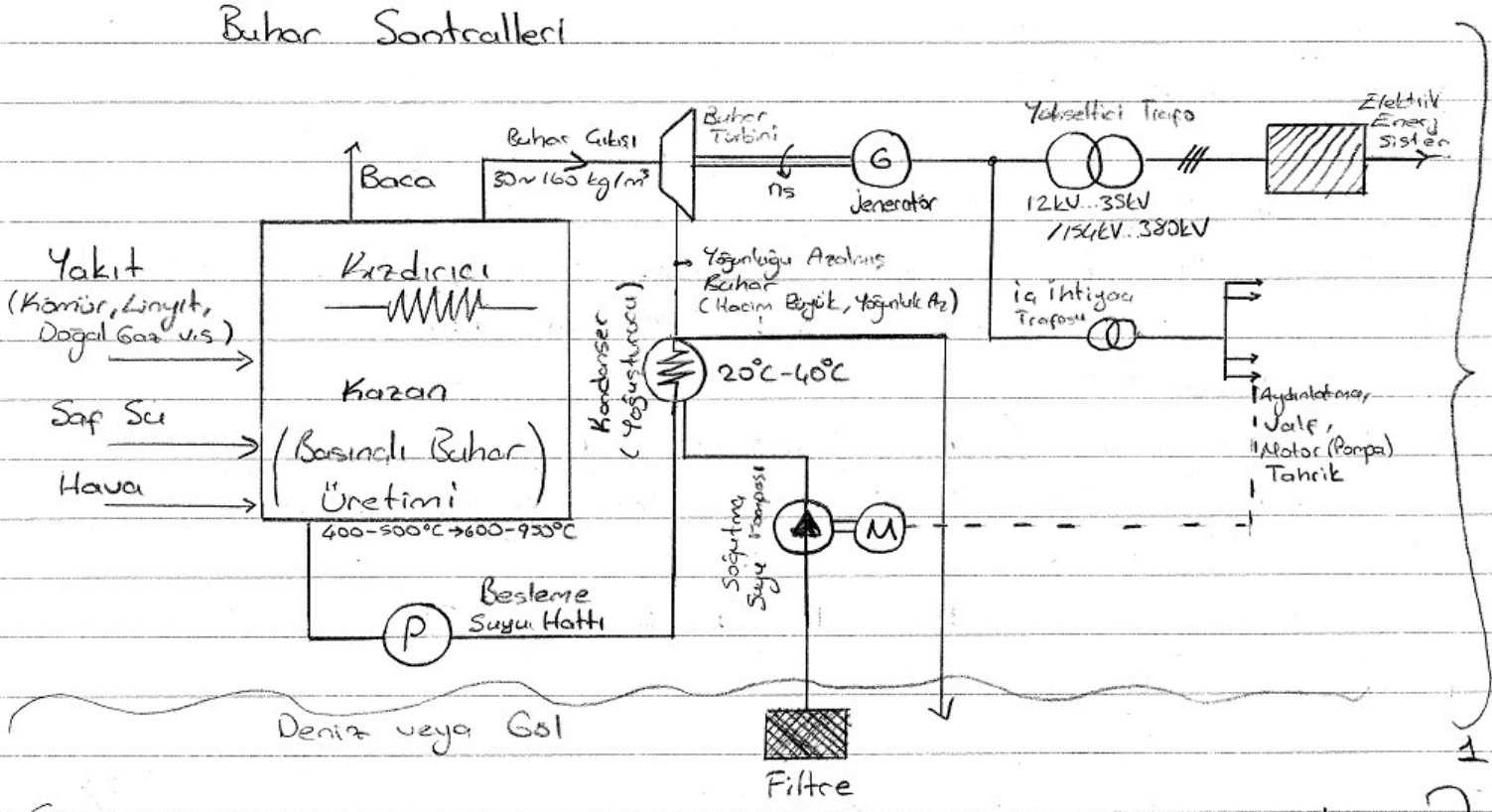
Dezavantajları;

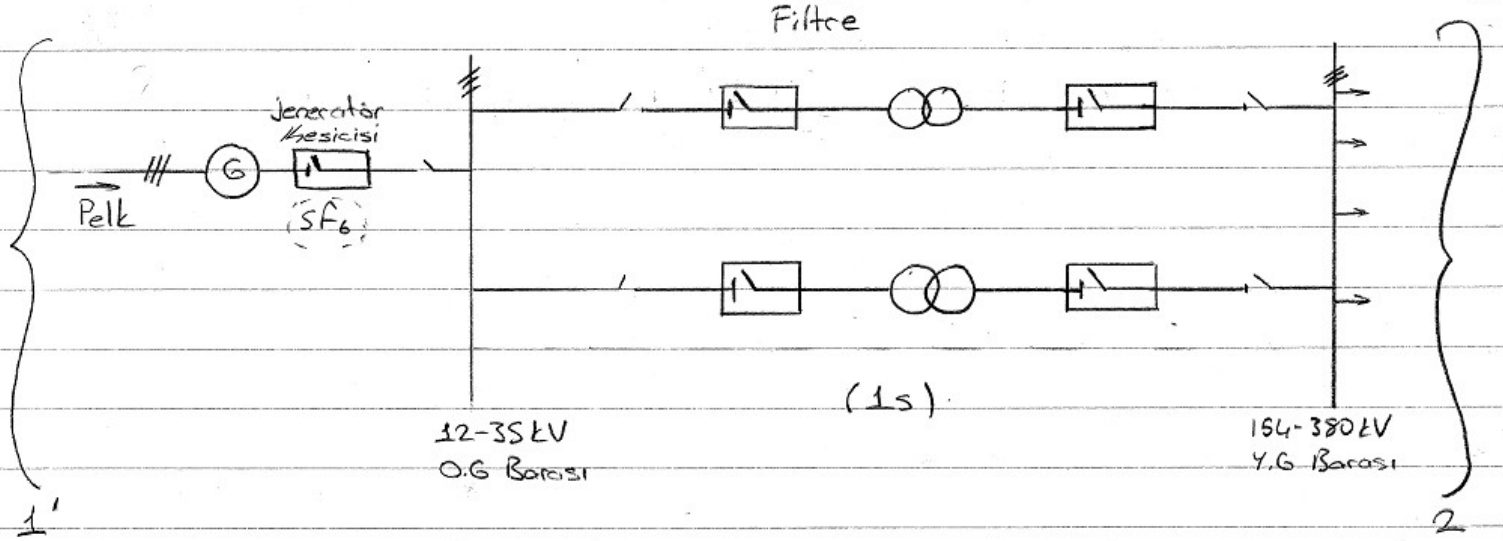
- İnşa süreçleri uzun ve maliyetlidir.
- Tüketici birimlerine yakın inşa edilemediklerinden üretilen elektrik enerjisinin iletimi için yüksek gerilim taşıma hatlarına gereksinimleri vardır.
- Baraj inşası sırasında;
  + Bölgenin ekolojik dengesinin bozulması.
  + Göl sahası içerisinde kalan tarım alanlarının kullanılamaz hale gelmesi.
  + Su seviyesinin yükselmesi ile kıyı erezyonunun artması.
  + Tarihi eserlerin sular altında kalması gibi durumlar söz konusu olabilir.

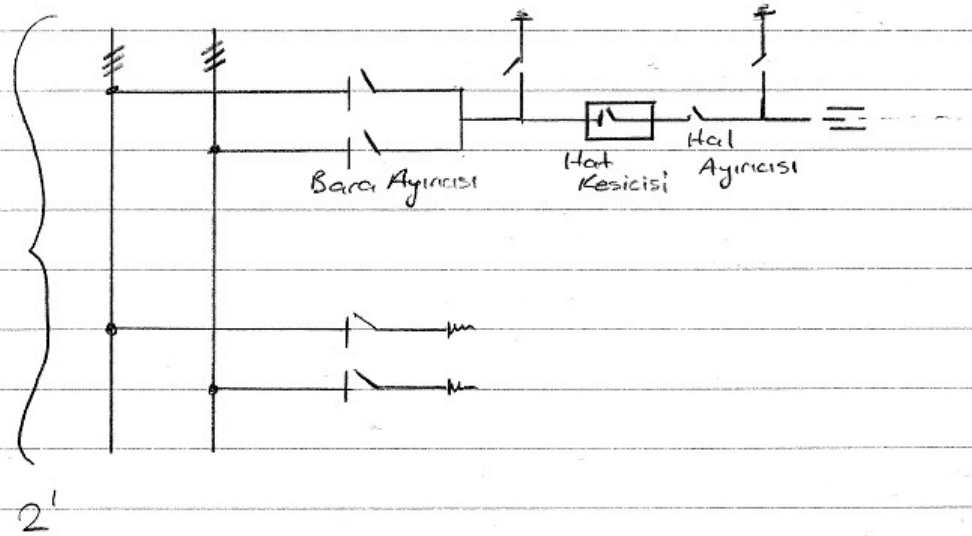
morning glory

TERMİK SANTRALLER

Buhar Santralleri







morning glory

Kazan içecisindeki boru demetinden geçen saf su ısı alarak buhar haline dönüşür. Daha sonra kızdırıcı biriminde buharın nemi alınıp sıcaklığı daha da yükseltilir ve buhar türbini kısmına sevk edilir. Türbin çıkışında yoğunluğu azalan (hacmi artan) buhar soğutucu durumundaki kondanser biriminden geçirilir ve soğuyarak su haline dönüşür, daha sonra ise pompa ile tekrar kazana sevkedilir. Bu süreç döngüsel olarak devam eder.

Deniz veya gölün bulunmadığı ortamlarda soğutma suyu, soğutma kulesinden temin edilir.

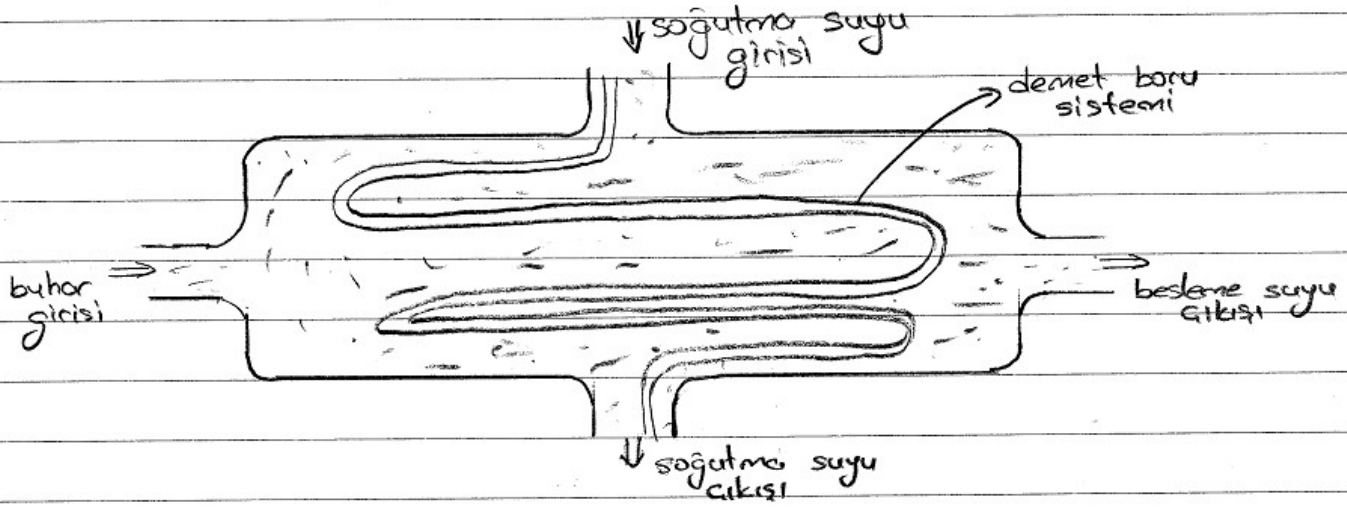
Soğutma suyu bir pompa ile kondanserce aktarılmaktadır ve kondanser çıkışında ısınan su tekrar denize/göle veya soğutma kulesine gönderilir.

* saf su kullanılmaz ise;

Boru kesiti

→ metalik bölgede mineraller birikir ve basınçta düşme gerçekleşir.

Kondanser:



-işlevi: Türbin çıkışındaki yoğunluğu azalmış (hacmi artmış) buharı hızla soğutarak tekrar su haline getirmektir.

Bu amaçla kondanser içerisinden eodirek temas halinde bir soğutma suyu sirkülasyonu gerçekleştirilir. Soğutma suyu demet boru sistemiyle kondanserce girer ve boruların çevresindeki buhar suya dönüşerek kazana geri döner.

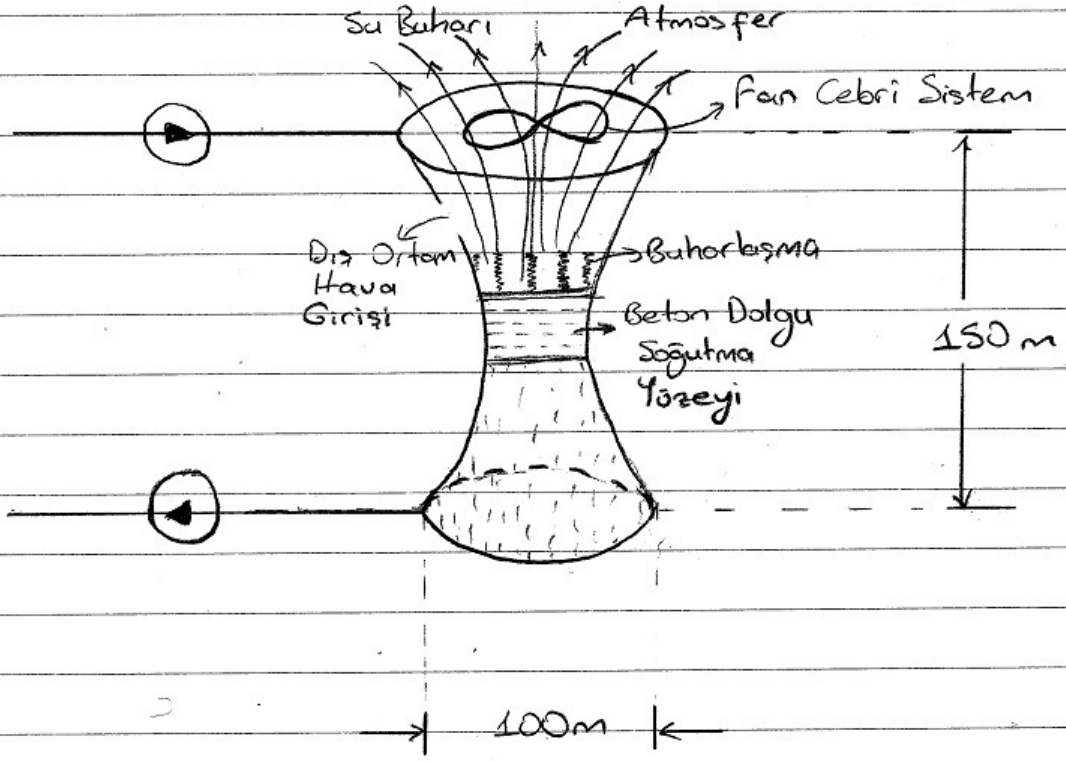
Soğutma suyu ve su-buhar devresinin suyu (besleme suyu / saf su) bir birine karışmaz.

Kondanser, türbin giriş-çıkışındaki buhar basıncı farkının büyük olmasını sağlayarak türbin verimini artırır.

morning glory

24.10.2011

Soğutma Kulesi



Cebri Çekişli - Karşı Akışlı Soğutma Kulesi Çalışma Prensibi

- Cebri çalışmada fanlar yukarıdadır.
- Sıcak su yukarıdan küçük damlacıklar halinde püskürtülür. Daha sonra düşen damlacıklar beton bloklara çarparak dağılırken karşılıklı menfezlerden gelen dış havayla karşılaşırlar. Böylece sudan alınan ısı atmosfere verilir, rüzgar ve hava difüzyonu yardımıyla ısı dağılımı geniş bir alana yayılır.

Ekonomizer

Buhar santrallerinde baca gazından elde edilen ısının kazan girişine gelen dış hava ve besleme suyunun ısıtılarak kazana verilmesinde katkı sağlayacak şekilde kullanılmasını sağlar ve kazan verimini artırıcı bir işlev görür.

morning glory

Eski buhar santrali tasarımlarında sadece üretilen elektrik enerjisinden yararlanıldığı için verim genellikle %30-40 civarındayken yeni tasarımlarda "co-generation" (bileşik ısı + elektrik üretimi) vasıtasıyla baca ve türbin çıkışındaki ısıdan yararlanılması sayesinde bu oran %70-80 civarına çekilebilmektedir.

*"Co-Generation" ve "buhar santrallerinde verim artırma çalışmaları" ödev konusu için seçilebilir.

Zonguldak - Çatalağzı Termik Santrali

- Kurulu Güç : 2 x 150 Mw
- Santral Sahası : 1.211.000 m^2
- Santral Besleme Suyu : 40 ton/saat [Doğal Gölet]
- Soğutma Suyu : 2 x 20.000 ton/saat [Denizden]
- Kazan Kapasitesi : 480 ton/saat
- Buhar Sıcaklığı : 535°C
- Buhar Basıncı : 139,5 kg/cm^2
- Kazan Boyutu : 12 x 12 x 87 m
- Türbin Hızı : 3000 devir/dakika

700Mw için ; soğutma kulesi mevcutsa 70.000 m^3/saat, deniz veya göl kaynak olarak kullanılıyor ise 100000 m^3/saat soğutma suyuna ihtiyaç vardır.

morning glory

Buhar Santrallerinde Kullanılan Ham Enerji Kaynakları

Enerji birimleri;*

1 joule = 1 ws = 1 Nm = 10 kCal
1 kCal = 4,187 kj = $(1,163).10^{-3}$ kwh
1 kj = $(0,278).10^{-3}$ kwh = $(238,8).10^{-3}$ kCal
1 kwh = $(3,6).10^{3}$ kj = 860 kCal

* Bu değerler sınavda verilecektir.

Katı Maddeler

1) Taş Kömürü: Sert kitleler halinde bulunup toz oluşturmaz, bundan dolayı taşıması kolaydır. Bu sayede santraller yerleşim yeri yakınlarına kurulabilir.

Hu* = Alt ısı değeri (1 kg'lık yakıtın ısı değeri)

Hu = 7000 kCal/kg ≅ 30.000 kj/kg

* Bu değerler sınavda verilecektir.

(Ör: Catalağzı Termik Santrali)

2) Linyit: Özgül ağırlığı düşük ve hacmi fazladır. Bu nedenle taşıma sırasında toz oluşumu yüksek, naklı ise zor ve pahalıdır. Santralin linyit yatağı yakınına kurulması gerekir.

Hu = 2500-4500 kCal/kg ≅ 10.000-18.000 kj/kg

morning glory

3) Çekirdek Enerjisi

U^{235} için $Hu = 2.10^{10}$ kCal/kg $\cong (8,4).10^{10}$ kj/kg

(1 kilo Uranyum'dan elde edilen enerji 8000 ton Linyite eşdeğerdir).

Sıvılar

1) Fuel-Oil

$Hu = 10000$ kCal/kg $\cong 42000$ kj/kg

Gazlar

1) Doğalgaz

$Hu = 9300$ kCal/m^3 $\cong 39000$ kj/m^3

(Ör: Ambarlı Termik Santrali)

morning glory

Buhar Santrallerinin Avantajları-Dezavantajları

Avantajları;

- Kurulum maliyetleri (özellikle Doğalgaz santrallerinde) ve süreleri nispeten düşüktür.
- Özel engeller bulunmadığında tüketici birimlerine yakın kurulabilirler.
- Ham enerji depolama imkanları mevcuttur.

Dezavantajları;

- Enerji üretmek için nispeten fazla işleme ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle kullanılan ekipman sayısı fazladır. Bakım, işletme ve personel giderleri yüksektir.
- Çevreyle uyumlu değildirler ve atık sorunu söz konusudur. (%30 kül oluşumu v.s). Filitreye ihtiyaç duyarlar.
- Yakıt maliyeti söz konusu olduğu için enerji maliyeti bu durumdan doğrudan etkilenir.
- Hidroelektrik santrallerden daha geç devreye girerler. (Kazanın hazırlanmasından dolayı, yaklaşık olarak 1 saat civarı.)

Genel Maliyet Hesabı

Buhar santrali için;

$$f_b = \frac{a_b \cdot P_b}{h'} + b_b$$

Su santrali için;

$$f_s = \frac{a_s \cdot P_s}{h'} + \underbrace{\emptyset}_{\text{Yakıt masrafı yok}}$$

a: Birim tesis masrafı [TL/kw]
P_s, P_b: Santral gücü [kw]
f_s, f_b: Enerjinin kwh maliyeti [TL/kwh]
b: 1 kwh enerji üretmek için yapılacak yakıt masrafı
h': İşletme süresi

* $a_b < a_s$ olsa dahi $b_s = 0$ olduğu için uzun vadede su santrali avantajlıdır.

morning glory

Buhar Santrallerinde Grupların Düzenlenmesi

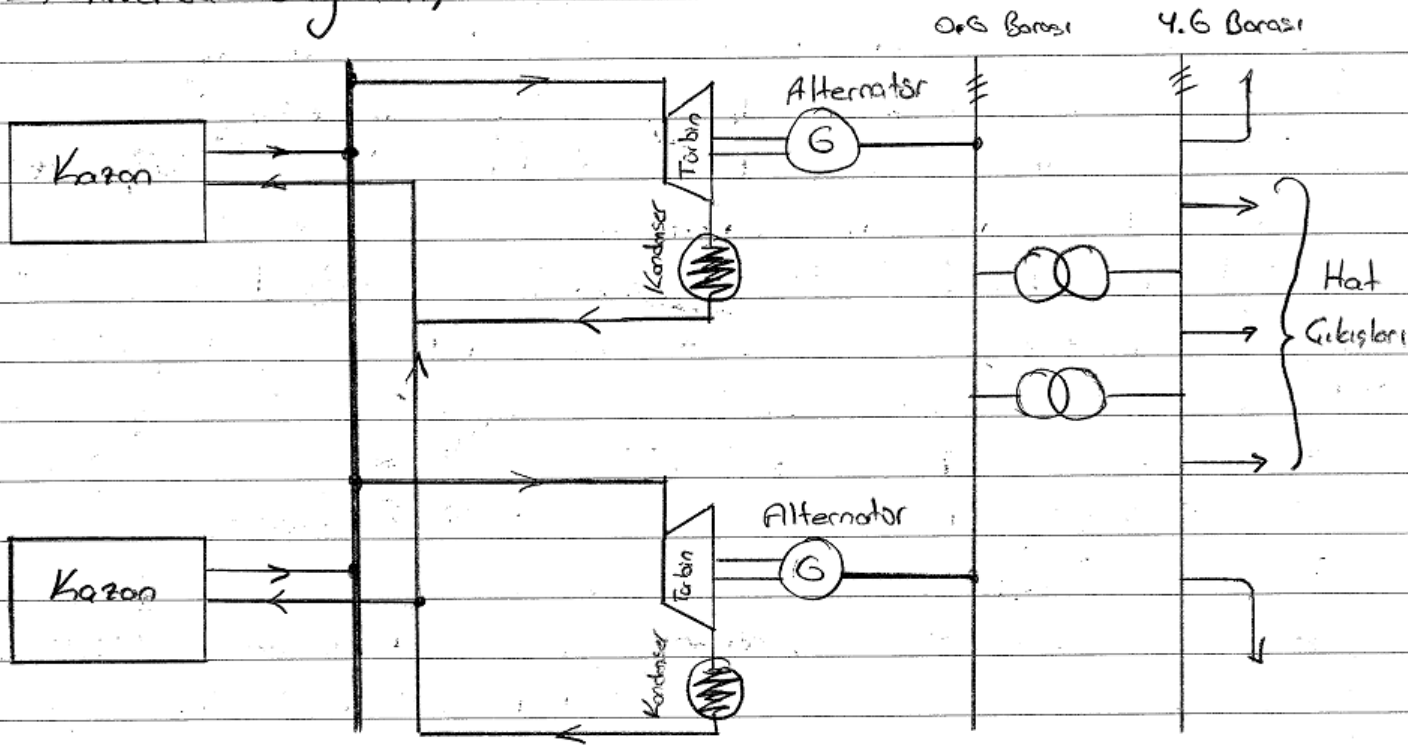
Santrallerde her jeneratör için;

- Bir adet tahrik makinesi,
- Bir adet iç ihtiyaç trafosu,
- Bir adet güç yükseltici güç trafosu,
- Bir adet kazan birimi bulunmaktadır.

Bunların tümüne "grup" veya "ünite" adı verilir.

Gruplar Arası Bağlantılar

1) Üniversal Bağlantı;



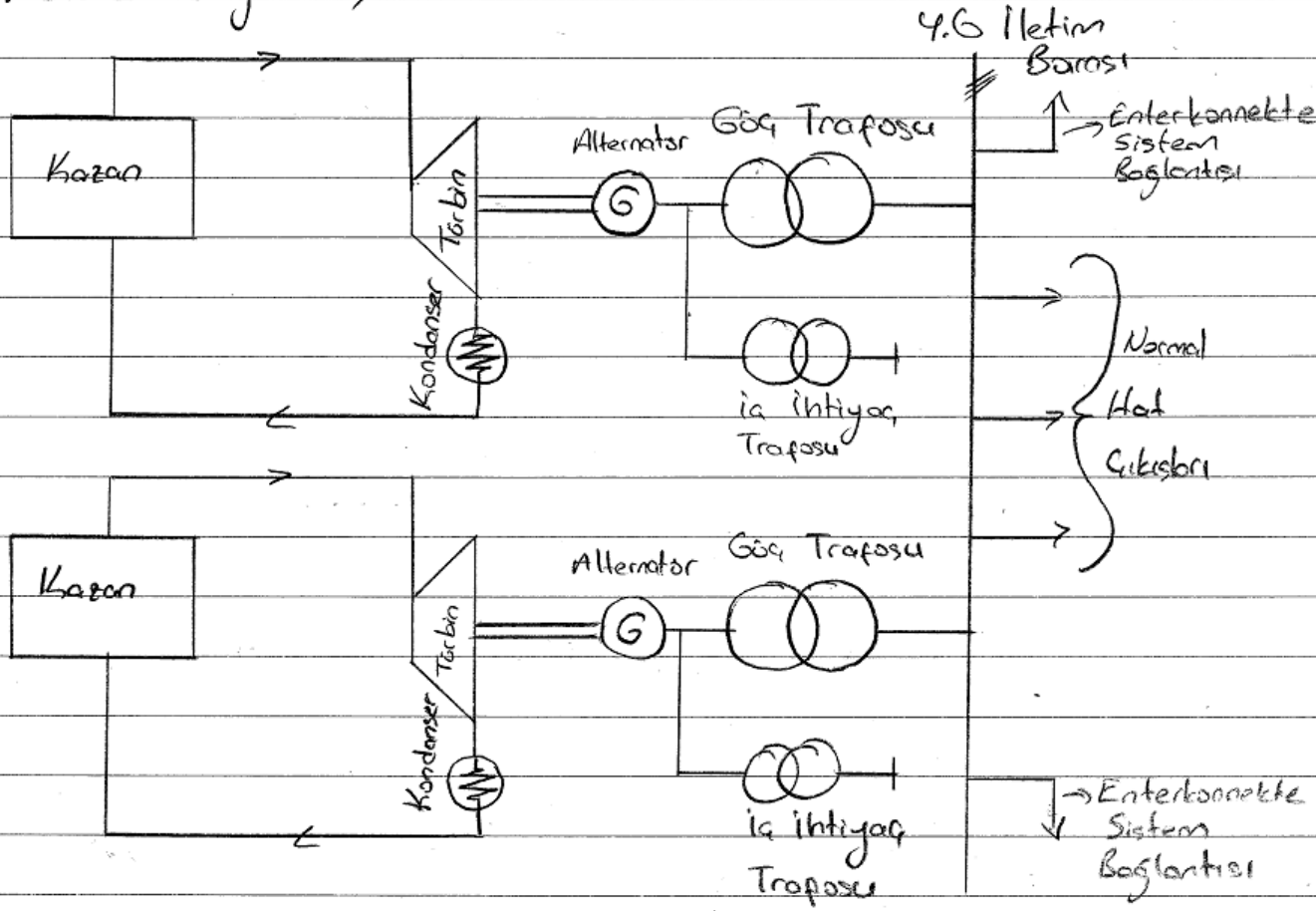
- Sistemde elemanlar paralel bağlı olduğu için çok sayıda anahtar, vana, pompa vs gibi bağlantı elemanı kullanılmaktadır. Bu durum sistemin kontrolünü zorlaştırır.

morning glory

- Bir kazan arızalandığında ve/veya buhar üretimi durduğunda diğer kazan vasıtası ile süreç destekleneceği için sistemde enerji sürekliliği söz konusudur, kesinti yaşanmaz.

- Günümüzde pek tercih edilmemektedir.

2) Blok Bağlantı;



- Her grup bir birinden bağımsızdır, sadece yüksek gerilim barasında çıkışlar bir birine bağlanır.

- Blok elemanlarından biri arızalı olduğunda sorunlu blok tamamen devreden çıkar, blokların bir birine katkısı yoktur.

- Kontrolü ve montajı kolay olduğu için kullanımı yaygındır.

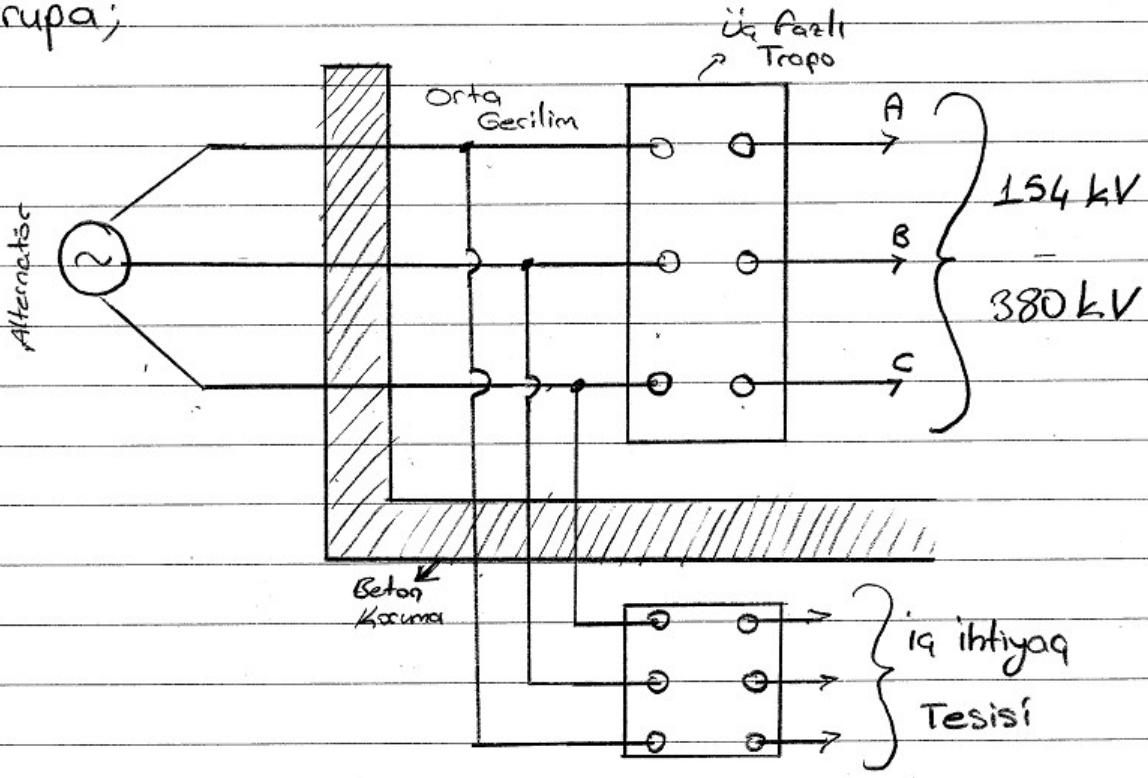
*$P_{santral} = P_{puant} + P_{yedek} + P_{iç}$

morning glory

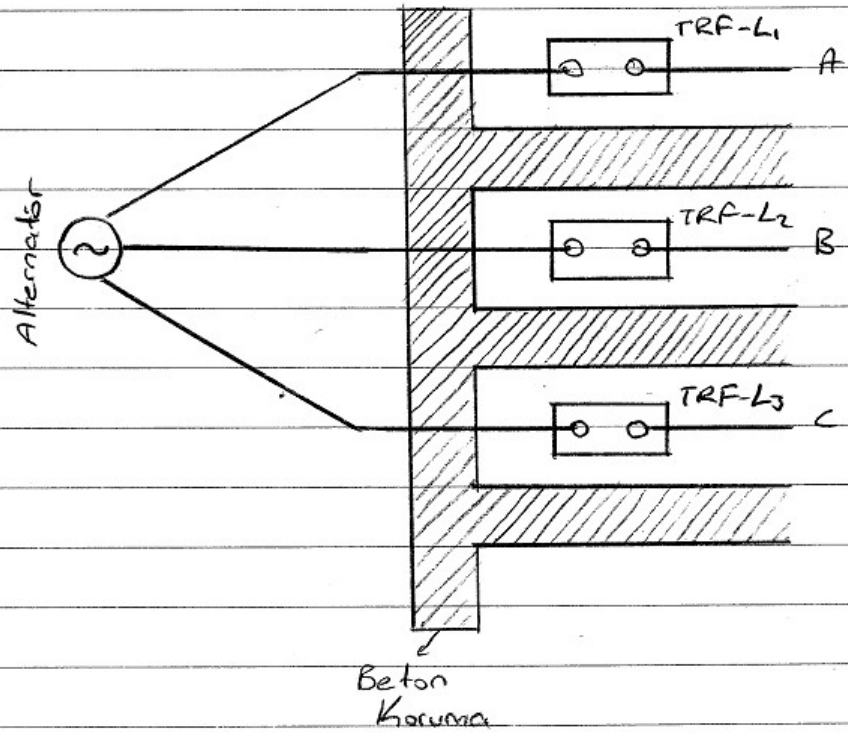
01.11.2011

TRANSFORMATÖR TESİSLERİ

Avrupa;



Amerika;



3 Adet
Tek Fazlı
Trafo

morning glory

Transformatör ve jeneratörler herhangi bir yangın, patlama ve benzeri tehlikeden tümüyle zarar görmemeleri için ayrı beton bölmelere yerleştirilmektedirler.

Tasarım Kriterleri

Akım kriterleri;

- Aşırı akıma dayanıklılık
- Kısa devre akımına dayanıklılık
- Sürekli (nominal) akıma dayanıklılık

Gerilim kriterleri;

- Aşırı gerilime dayanıklılık
  + Salt bazlı aşırı gerilim
  + Yıldırım aşırı gerilimi
- Sürekli (nominal) gerilime dayanıklılık

→ 1. Vize Konuları ←

Sınava ilgili;

1. Soru: Santrallerin blok çalışma diyagramı (çizimi) ve prensipleri, birimleri ve ek açıklamaları, avantaj ve dezavantajları. (35-40 puan)

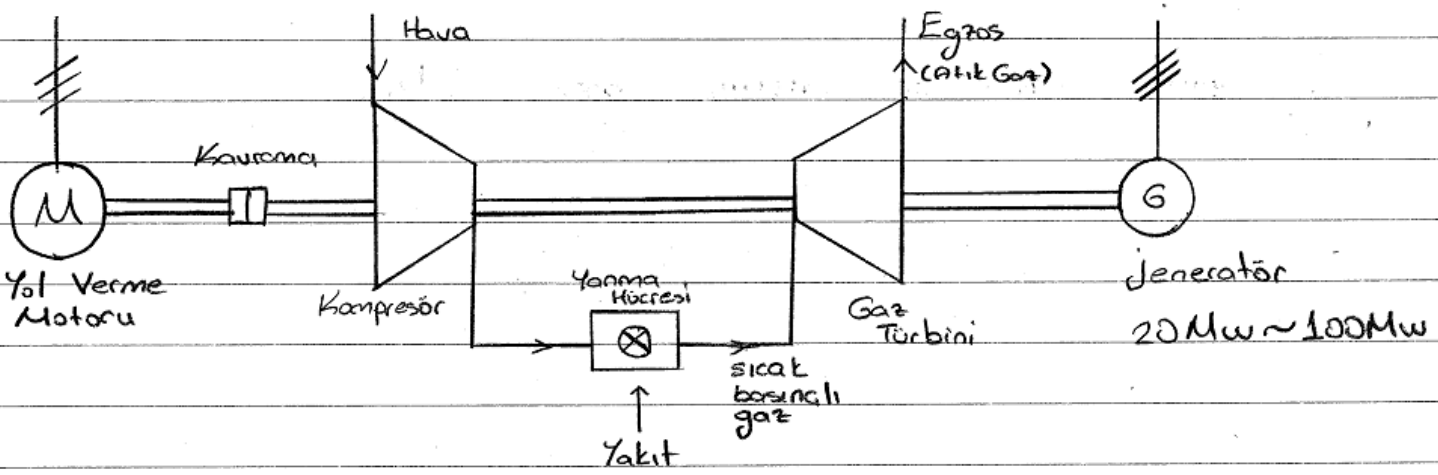
2. Soru: Derste çözülen su problemlerinden biri. (25-35 puan)

3. Soru: Süpriz soru. ("Süpriz" ne dir ya? =D) (25 puan civarı)

Süre: 60 Dakika ; Sınavlar ortak değil!

morning glory

GAZ TÜRBİNLİ SANTRALLER



(Açık devre prensipli, gaz türbinli santral)

Öncelikle ; ilk hareket, yol verme motoru ile sağlanır. Daha sonra atmosferden alınan hava kompresörde sıkıştırılır ve basıncı artırılır. Yanma hücresi çıkışındaki basıncı ve sıcaklığı yüksek gaz karışımı türbini döndürür.

Kompresör, türbin ve alternatör (jeneratör) birimleri bir birine bağlıdır. Türbin nominal devrine ulaşınca yol verme motoru kavrama donanımı ile sistemden -mekanik olarak- uzaklaştırılır.

Isıl değeri yüksek (Benzin, Fuel-Oil v.s.) yakıtlar tercih edilir.

Gaz santrallerinde kompresör birimine gelen dış hava soğuk olmalıdır. Isınan havanın genlesmesi nedeniyle sıkıştırılması güçleşir ve kompresör verimi düşer.

morning glory

Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları;

+ Yapıları buhar santrallerine göre oldukça basittir. (Kül filtresi, kondenser, kazan boru sistemi, soğutma kulesi v.b ekipmanlar yoktur.)

+ Az yer kaplarlar, yer gereksinimleri düşüktür.

+ Yol alma süreleri çok düşüktür. (3-5 dk, max 10dk)

+ Yedek ve puant güç santrali olarak kullanılabilirler.

+ Tesis maliyetleri ve kurulum süreleri düşüktür.

+ 20 Mw ~ 100 Mw arası güç sahasında kullanımları en ekonomik düzeydedir.

Dezavantajları;

- Verimleri düşüktür.

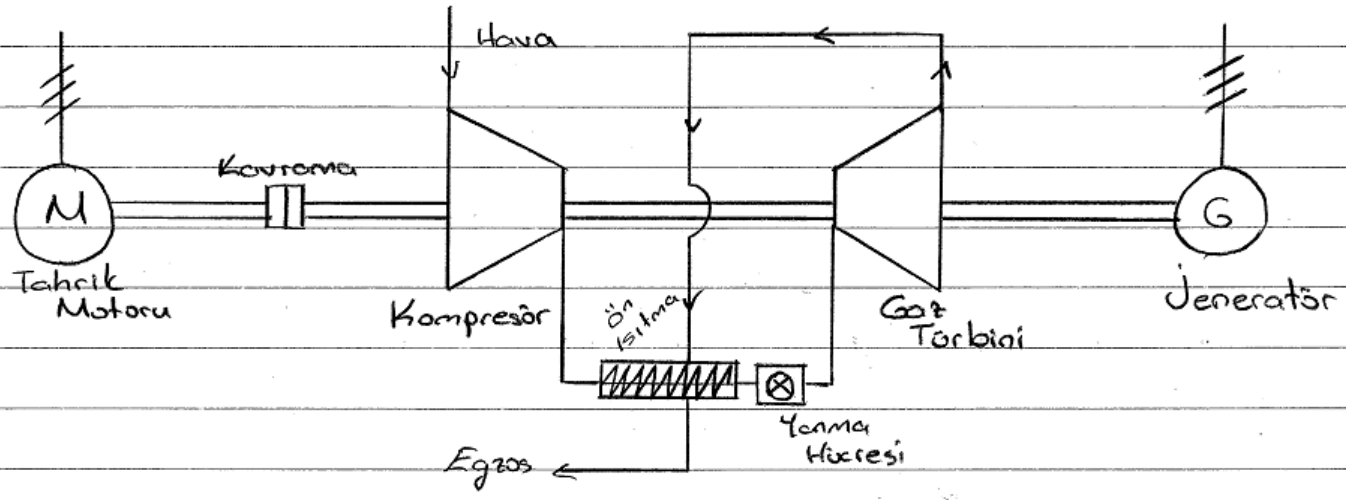
- Yakıt masrafları yüksektir

- Atık sorunları nedeniyle çevre ile uyumlu değillerdir.

- 20 Mw altında kullanımları ekonomik değildir, (Bu düzeyde mikro santral motorları ve dizel santrallerin kullanımı daha yaygındır.)

morning glory

Açık devre prensipli gaz türbinlerinde verim %30 civarındadır. Bununla birlikte türbin çıkışındaki artık (çürük) gaz yardımıyla kompresör çıkışındaki havaya, yanma hücresine gelmeden önce, ön ısıtma işlemi uygulanırsa verim yaklaşık %35-36 civarına yükselir.

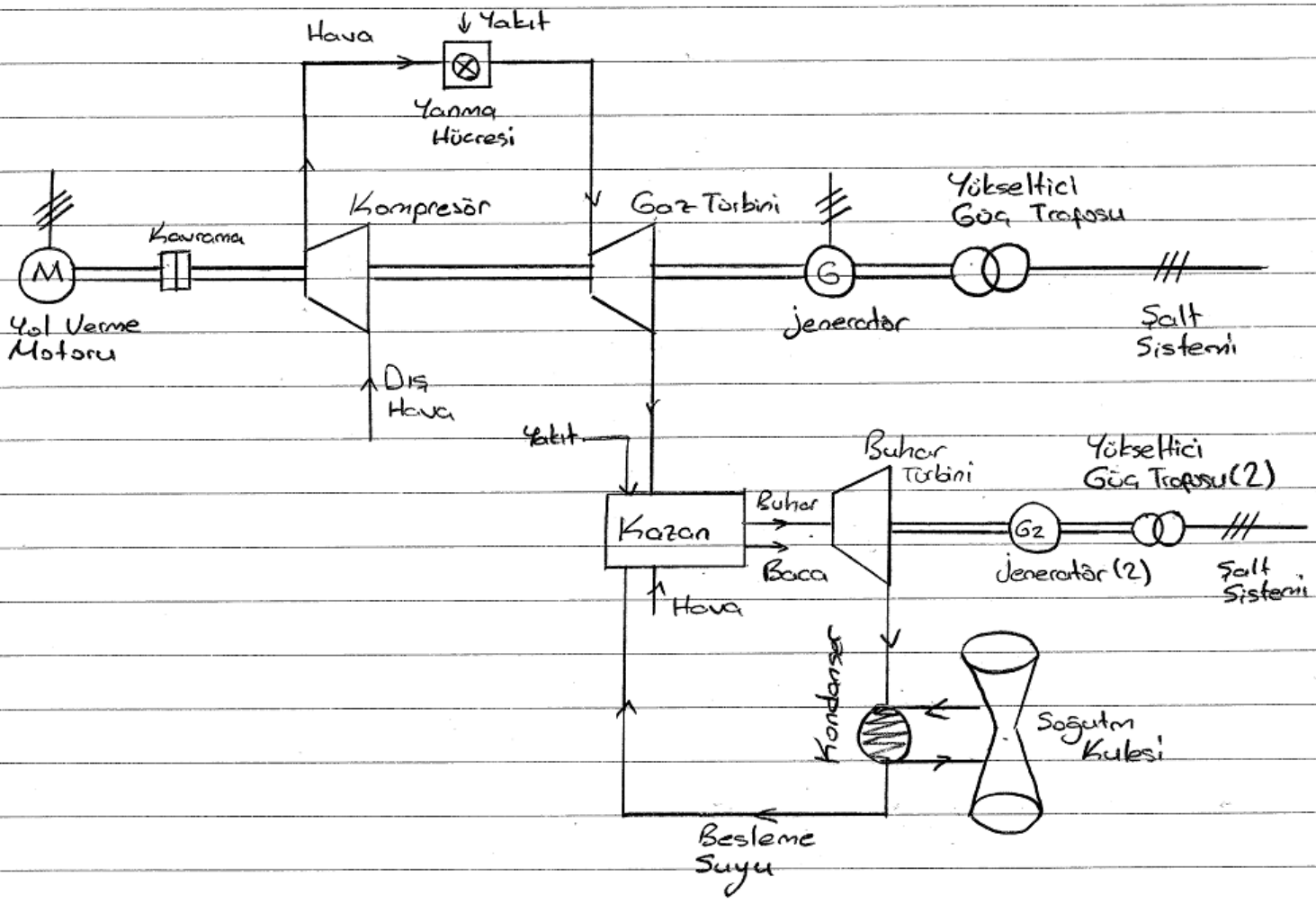


(Ör: Bozcaova ve Seydişehir gaz türbinli santralleri)

morning glory

29.11.2011

Kombine Çevrimli Gaz Santrali



Gaz türbini çıkışındaki sıcak gaz karışımı bir buhar santralindeki kazanın ısıtılma işlemine katkı sağlayabilir. Böylelikle buhar santralinde daha az yakıt harcanır ve verim %42-45 seviyelerine kadar çıkarılabilir.

morning glory

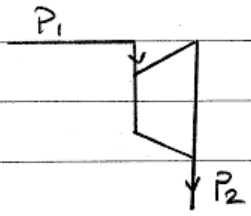
Türbin + Alternatör Birimi

Buhar ve gaz türbinlerinin içerisindeki buhar/gaz akışı türbin dönüşünü sağlar.

$$P = \Delta P \cdot k \cdot Q$$

Q: Türbinden geçen buharın veya gazın debisi

k: Güç sabiti



$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad \{ P_1 > P_2$$

Buhar ve gaz türbinlerinde -yapıları gereği- hız çok yüksektir. Bu nedenle bu türbinlerde yuvarlak rotorlu senkron alternatörler tercih edilir.

$$n_s = \frac{60f}{p}, \quad f = 50\ Hz \text{ ve } f = 60\ Hz$$

p = Çift kutup sayısı (küçük olması tercih edilir)

$f = 60\ Hz$, $p = 1$ için $n_s = 3600$ dev/dk

$f = 50\ Hz$, $p = 1$ için $n_s = 3000$ dev/dk

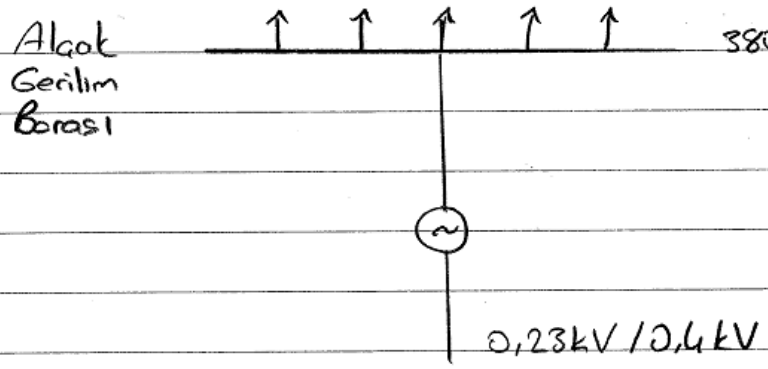
Buhar ve gaz türbinlerinin devir sayılarının çok yüksek olması nedeniyle bu türbinlerde merkezkaç kuvveti çok yüksektir. Bu nedenle kullanılan alternatörlerin rotor çapları sınırlı tutulmaktadır. Bu sınırlama, motor gücünün artması ile birlikte rotorda boyuna büyümeyi de birlikte getirir.

morning glory

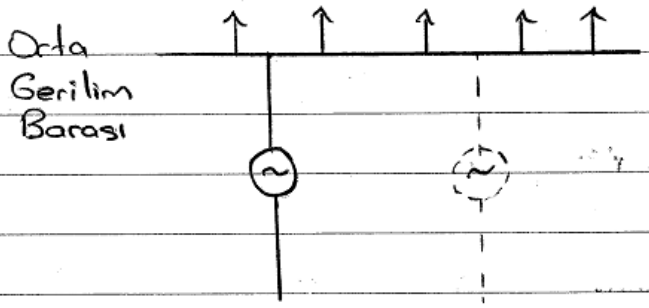
Santral Gerilimi, Grup Sayısı ve Makine Gücü

Santral Gerilimi

1) Alçak Gerilim Santrali



2) Orta Gerilim Santrali

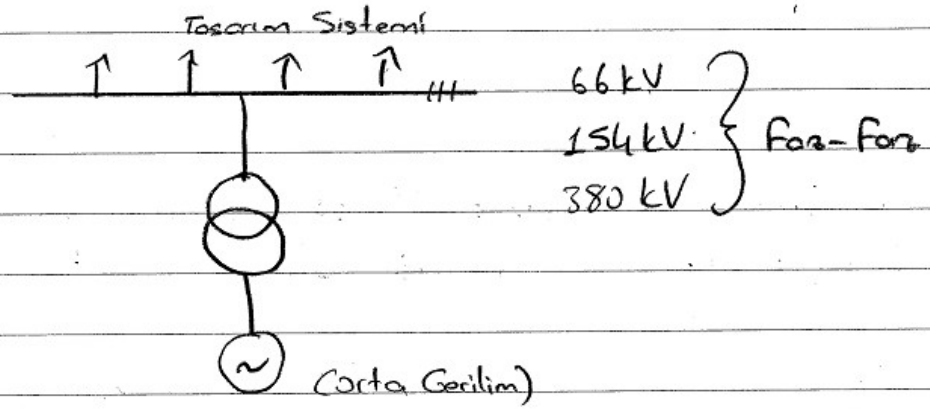


Nominal Gerilim		Santral Çıkış Gerilimi*
6 kV	—	6,3 kV
10 kV	—	10,5 kV
15 kV	—	15,75 kV
20 kV	—	21 kV

* Gerilim düşümünü telafi etmek amacıyla.

morning glory

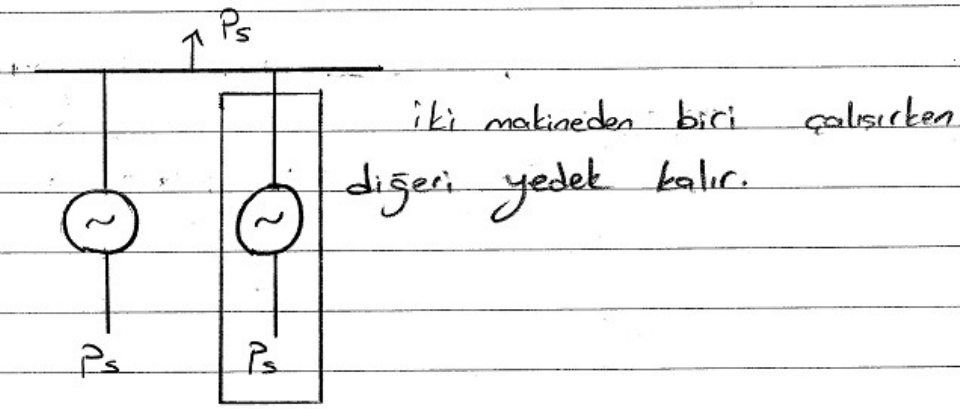
3) Yüksek Gerilim Santrali



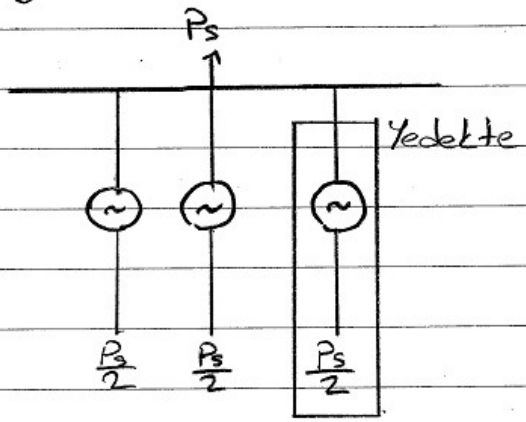
Grup Sayısı

Grup sayısına etki eden faktörler;

a) Santral kurulu gücü (P_s) < 65 kVA ise;



b) Santral kurulu gücü (P_s) > 65 kVA ise;



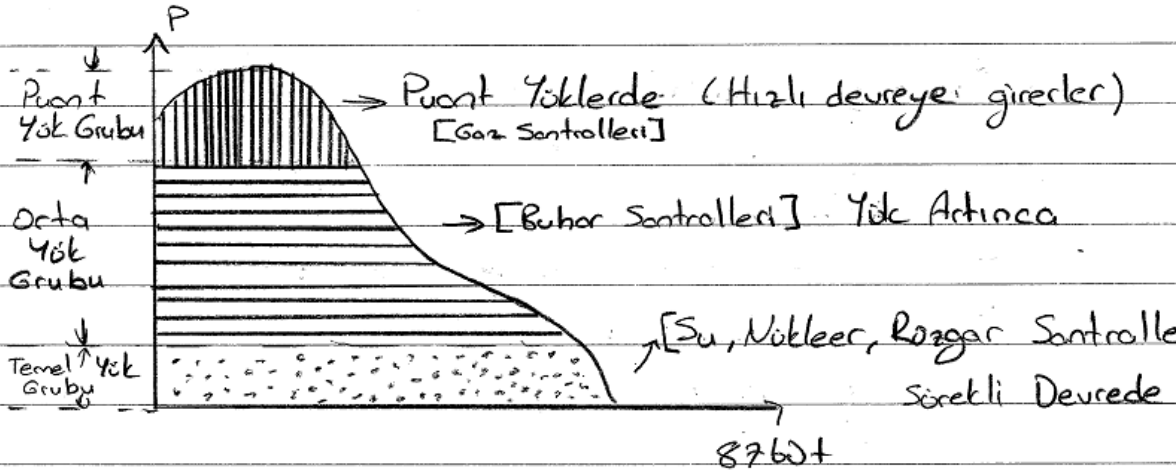
morning glory

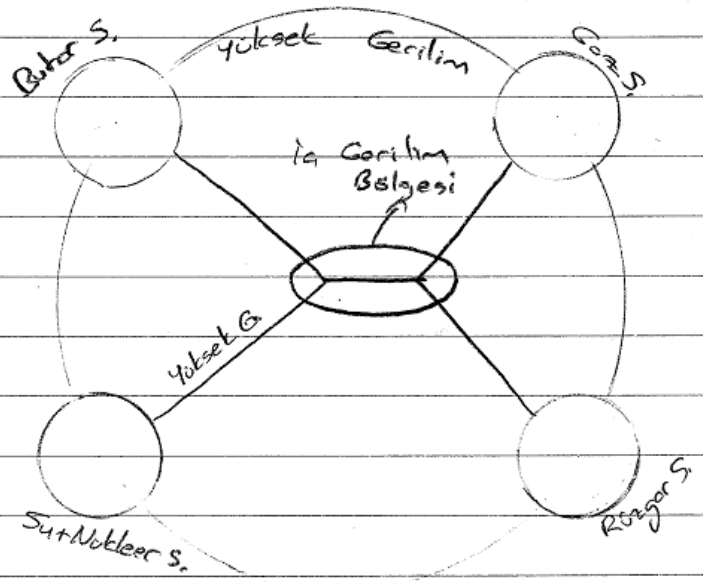
Santral enterkonnekte şebekede çalışıyorsa çoklu gruplara bölmeye gerek yoktur çünkü makine gücü yükseldikçe genel santral verimi de yükselir.

Yedek parça bulma kolaylığından dolayı grupların hepsinin aynı güçten seçilmesine dikkat edilir.

Grup sayısını belirlemek için "düzenlenmiş yıllık yük eğrisine*" bakılır.

* (Düzenlenmiş Yıllık Yük Eğrisi)





Enterkonnekte Sistem

morning glory

Grup Türleri

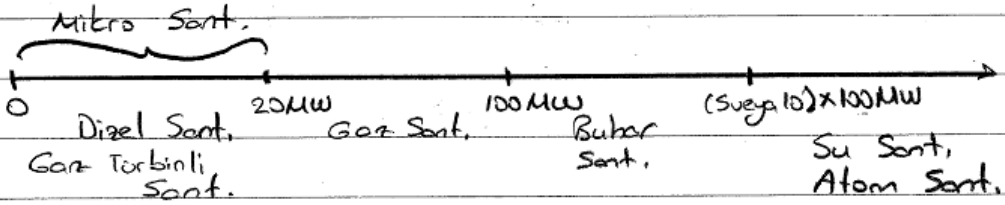
1) Temel Yük Grubu: Ucuz enerji üretimi; Sürekli devrede; Yüksek güçlü

2) Orta Yük Grubu: (Buhar Santralleri)

3) Puant Yük Grubu: Verim düşük; Yakıt girdisi yüksek; Düşük güçlü; Kısa süreli devrede; (Gaz Santralleri)

4) Yedek Yük Grubu; (Buhar Santralleri, Gaz Santralleri)

Santrallerin Optimal Çalışma İçin Sınır Güçleri



Santral Yeri Seçimi Kriterleri

1) Tüketim merkezlerine mümkün mertebe yakın olmalıdır.

2) Su santralleri söz konusuysa su gücünün etkin kullanımı için en uygun yer seçilmelidir.

3) Arsası büyük, istimlak bedeli düşük olmalıdır.

4) Santrale ulaşım kolay olmalıdır.

5) Buhar santralleri söz konusu ise soğutma suyu temini için su kaynağına yakın seçilmelidir.

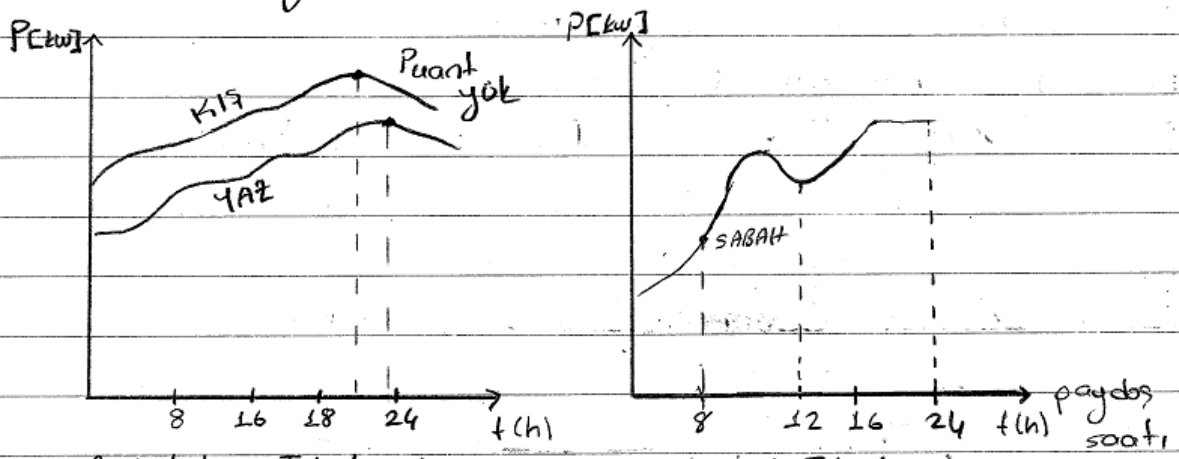
6) Deprem riski olan bölgelerde inşaat tekniği bakımından ilave önlemler alınmalıdır.

morning glory

06.12.2011

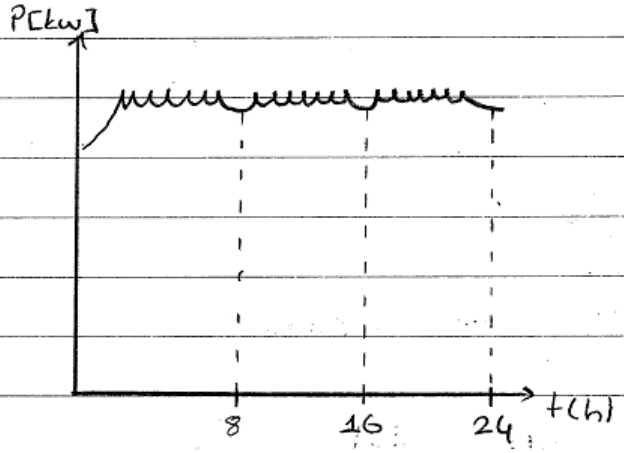
ELEKTRİK ENERJİSİ EKONOMİSİ

Temel Bilgiler

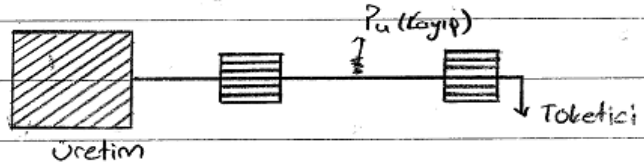


Aydınlatma Tüketicisi

Kuvvet Tüketicisi

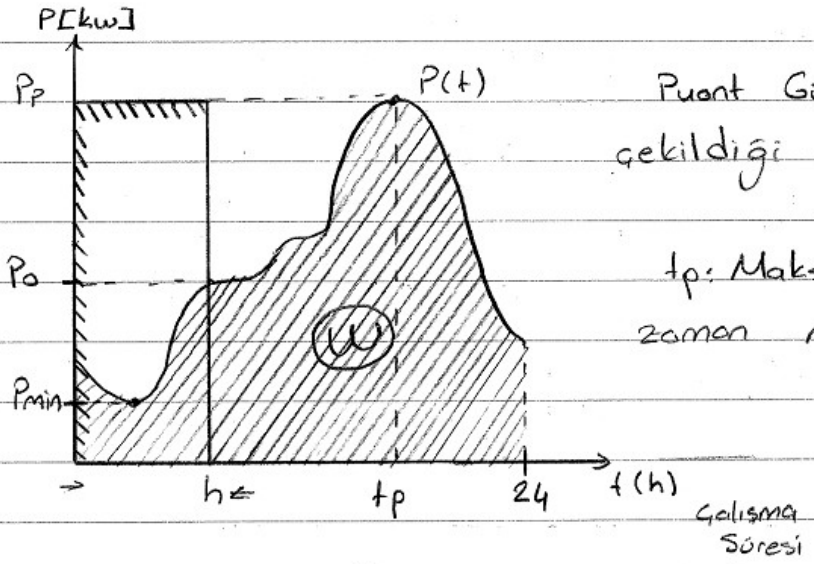


3 Vardiyalı Çalışan Endüstri Kuruluşu



morning glory

Günlük Yük Eğrisi Karakteristik Değerleri



Puant Güç: Gücün maksimum çekildiği değer.

tp: Maksimum gücün çekildiği zaman noktası

Günlük Enerji: $W = \int_0^T P(t).dt$

↳ Hatta verilen faydalı enerji

$W = P_o . t = P_p . h$

t: çalışma süresi, h: işletme süresi

maksimum enerji $\Rightarrow W_{maks} = P_p . 24$

yük değişim oranı $\Rightarrow v = \frac{P_{min}}{P_p}$

Bir günlük toplam enerjinin 24 saatte sabit bir güçle çekilmesi halindeki güç değeri

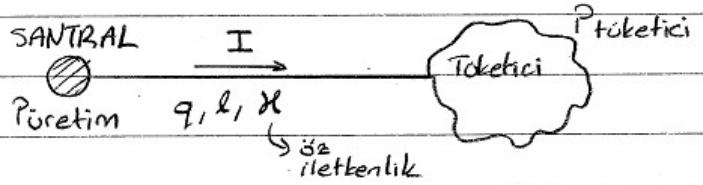
Ortalama Güç: $P_o = \frac{W}{24}$

İşletme Süresi: $h = \frac{W}{P_p}$

Yükleme Katsayısı: $m = \frac{W}{W_{maks}} = \frac{P_o}{P_p} = \frac{h}{24} < 1$

Eş Zamanlılık Katsayısı: $g = \frac{P_p}{P_{K(t)}}$

morning glory



$P_{üretim} = P_K + P_{tüketim}$

Kayıplar $\Rightarrow \underbrace{P_K} = 3RI^2 = 3.\frac{l}{x.q}.I^2$

hatta oluşan P_{cu} (Bakır) kayıpları

$$P_K(t) = 3.R.i^2(t)$$ Ani Değer Olarak

Kayıp Katsayısı : $K = \frac{P_K}{P_{tüketim}} \Rightarrow P_K = K.P_{tüketim}$

Su santrallerinde %10-12
Buhar santrallerinde %6-8
Gaz santrallerinde %4-6

* Üretim ucuz ise kayıp yüksek tutulabilir. Bu durumda iletken küçük seçilebilir, hat daha ekonomik tesis edilebilir. Ancak üretim pahalı ise hat kesiti büyük seçilebilir, "K" küçük alınıp kayıplar azaltılabilir.

{Puant güç dikkate alınarak}

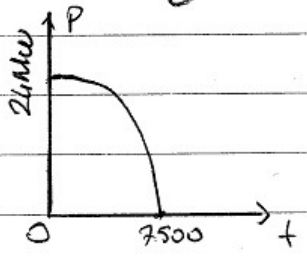
$P_{P(üretim)} = P_{K(maks)} + P_{P(tüketim)}$
$P_{P(üretim)} = K.P_{P(tüketim)} + P_{P(tüketim)}$
$P_{P(üretim)} = (1+K).P_{P(tüketim)}$

Örnek/ 16,8 km uzunluğunda 120 mm kesitinde bakır iletkenli üç fazlı bir kablo düzeninde 34,65 kV (faz-faz) gerilimde, 1 yılda çekilen enerjinin yıllık yük eğrisi $P(t) = -\frac{P_P}{T^2}.t^2 + P_P$ olarak verilmiş olsun.

a) Sınır değerleri dikkate alarak eğrinin çizimini yapınız.

$P_P = 24\,MW$
$T = 7500$ saat (çalışma süresi)
$\cos\varphi = 0,8$

$t = 7500 \Rightarrow P(7500) = 0$
$P(0) = 24\,MW$



morning glory

b) 1 yılda kablo üzerinden taşınan enerji, kablo gücü, işletme süresi, ortalama güç ve yükleme katsayısını bulunuz.

$$W = \int_0^T P(t).dt = \int_0^{7500} -P_P.\left(\frac{t^2}{T^2} - 1\right).dt = -P_P\left(\frac{1}{3}.\frac{t^3}{T^2} - t\right)\Big|_0^{7500}$$

$$= 120.000 \text{ MWh}$$

Ortalama güç: $P_o = \frac{W}{T} = \frac{120.000}{7500} = 16 \text{ MW}$

İşletme süresi: $h = \frac{W}{P_P} = \frac{120.000}{24} = 5000 \text{ saat}$

Çalışma süresi: $T = 7500$ (Revizyon saatleri çıkarılmış olarak)

Yükleme katsayısı: $m = \frac{P_o}{P_P} = \frac{16}{24} = 0,666$

c) Kablo üzerindeki en büyük kayıp gücü ve 1 yılda harcanan kayıp enerjiyi bulunuz.

$$P_{K(maks)} = 3RI^2_{maks}$$

$$\hookrightarrow \frac{\ell}{q.\pi} = \frac{(16,8).10^3}{120.56} = 2,5\,\Omega \text{ (tek faz)}$$

$$I_{maks} = \frac{P_{puant}}{\sqrt{3}.(34,65).10^3.(0,8)} \cong 500 \text{ A}$$

$$P_{K(maks)} = 3.(2,5).(500)^2 = 1,875 \text{ MW}$$

morning glory

$$W = \int_0^T P(t).dt$$

$$W_{kayip} = 3.R \int_0^T i^2(t).dt$$

$$i(t) = \left[\frac{P(t)}{\sqrt{3}.U_n.\cos\varphi}\right]^2$$

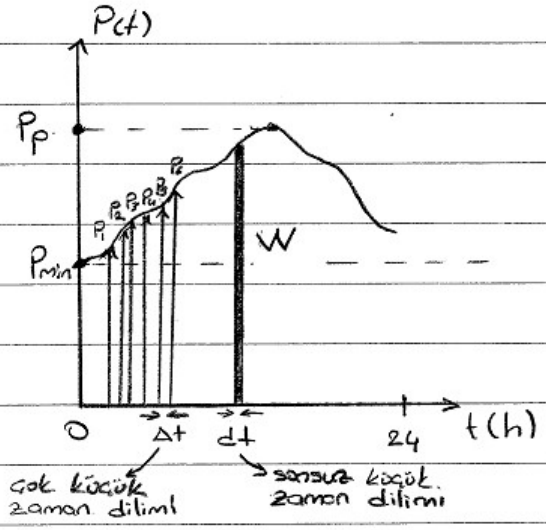
$$i^2(t) = \left[\frac{P_p}{\sqrt{3}.(34,65).10^3.(0,8)} \cdot \left(-\frac{t^2}{T^2}+1\right)\right]^2 = \left[500.\left(-\frac{t^2}{T^2}+1\right)\right]^2$$

$$W_k = 3.R \int_0^{7500} \left[500\left(-\frac{t^2}{T^2}+1\right)\right]^2 = 7500\ Mwh\ (1\ yıl\ için)$$

morning glory

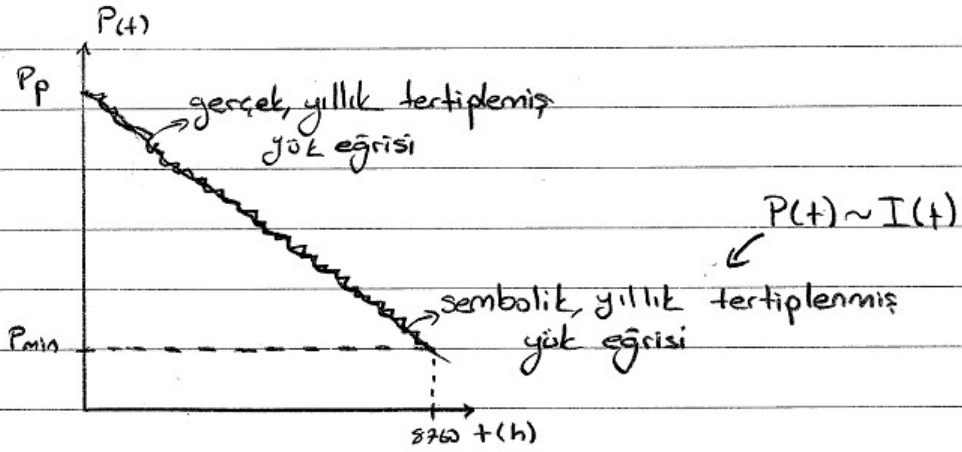
13.12.2011

Düzeolenmiş Yıllık Yük Eğrisi

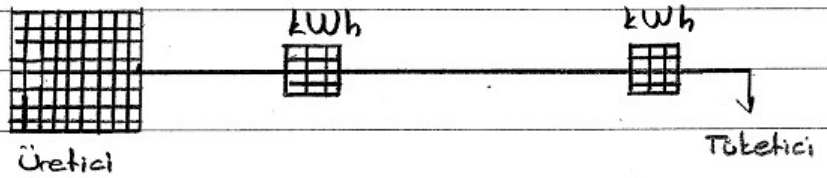


$$W_T = \sum_{i=1}^{365} W_i = \underbrace{P_1 \cdot \Delta t}_{W_1} + \underbrace{P_2 \Delta t}_{W_2} + \dots + \underbrace{P_n \cdot \Delta t}_{W_n}$$

$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt$$



$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt$$



$$W_k = 3 \cdot R \int_0^T I^2(t) \cdot dt$$

morning glory

Karakteristik Değerler

1) Bir yılda üretilen enerji;

$$W = \int_0^T P(t).dt$$

için bir günlük eğri bir saatlik dilimlere ayrılır, bu dilimler de uzunluk sırasına göre dizilir. Aynı işlem yılın tüm günleri için yapılırsa, "santral çıkışında yıllık tertiplenmiş yük eğrisi" elde edilir.

2) Puant güç (Santralin üreteceği maksimum güç);

$$P_p = P_{maks.}$$

3) Santralin üreteceği maksimum enerji;

$$W_{maks} = P_p.8760$$

4) Ortalama güç;

$$P_o = \frac{W}{8760} = \frac{\text{hatta verilen yıllık faydalı enerji}}{\text{hattın çalışma süresi } (365 \times 24)}$$

5) Çalışma süresi;

$$T(maks) = 8760 \text{ saat}, \quad T \leq 8760 \text{ h (saat)}$$

6) İşletme süresi (Puant gücü kullanma süresi);

Bir işletmenin normal şartlar altında bir yılda verdiği enerjiyi puant güç ile çalışması gereken süre.

$$h = \frac{W}{P_p}$$

morning glory

7) Yüklenme katsayısı;

$$m = \frac{W}{W_{maks}} = \frac{P_o}{P_p} = \frac{h}{8760} < 1$$

8) Santral gücü;

$$P_s = P_p + P_y + P_i$$

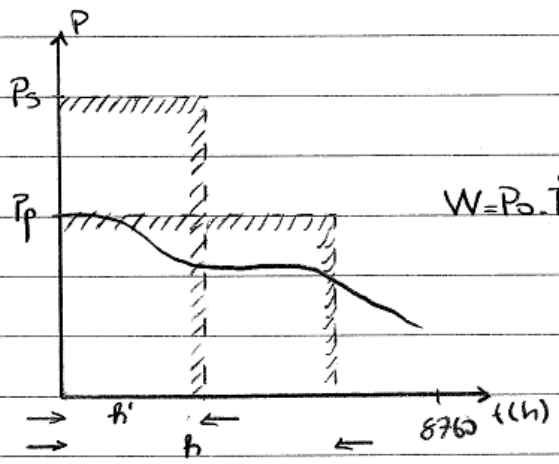
- P_s: Santral Gücü
- P_p: Puant Güç
- P_y: Yedek Güç
- P_i: İç İhtiyaç Gücü

9) Faydalanma katsayısı;

$$n = \frac{W}{P_s \cdot 8760}$$

10) Santral gücüne göre işletme süresi (Santral gücünü kullanma süresi);

$$h' = \frac{W}{P_s}$$



Çalışma Süresi

$$W = P_o \cdot T = P_p \cdot h = P_s \cdot h'$$

h': işletme Süreleri

morning glory

11) Eş zamanlılık katsayısı

Belirli bir zaman aralığında tüketicilerin eş zamanlı maksimum talep güçlerinin bu zaman aralığı içerisinde santrallerin maksimum üretim güçlerine (puant güç) oranıdır.

$$g = \frac{P_p}{\sum_{i=1}^{n} P_{pi}}$$ n: tüketici sayısı

Not:

g_{genel}: 0,1 ~ 0,3

$g_{merkezi}$: 0,6 ~ 0,9

Santral Gücü Hesabı

Santral gücü en az puant güç kadar olmalıdır. Ancak bu yaklaşım yeterli olmaz. Santralin kendi içinde aydınlatma, pompa ve benzeri elemanlar için güç ihtiyacı da göz önüne alınmalıdır. (Ki buna "iç ihtiyaç gücü" demekteyiz.)

İç İhtiyaç Gücü (P_i)

$P_i = i \cdot P_p$

i: iç ihtiyaç katsayısı

Buhar santrali: i = %5 ~ %7,5

Su santrali: i = %0,5 ~ %1

morning glory

Yedek Güç (P_y)

Yedek güç ihtiyaç için ya her alternatörün gücü imalatçının izin verdiği sınıra kadar artırılır ya da yedek bir makine grubu sisteme ilave edilir. Alternatörün gücünü nominal güç üzerinde artırmak kayıpları yükseltmekte, verimi azaltmakta olduğu için uygun değildir.

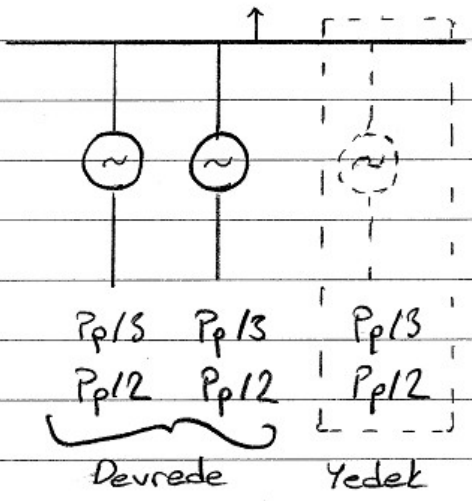
Yedek makineler duran veya dönen tarzda olabilir. Duranlar yedek güç ihtiyaç anında çalışmaya başlar; dönen ise boşta çalışmaktadır ve ihtiyaç anında birkaç saniye içerisinde devreye girer.

Yedek güç katsayısı (y)

$P_y = y \cdot P_p$

enterkonnekte şebeke → $y = \%10$
küçük şebeke → $y = \%30$
rafinecilerde → $y = \%100$

} ortalama %20-30



Santral Gücü (P_s)

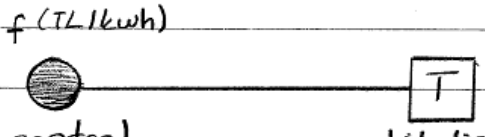
$P_s = P_p + P_i + P_y = P_p(\underbrace{1+y+i}_{\text{Rezerv Katsayısı}})$, * "i" ihmal edilebilir

$P_s = \mu \cdot P_p$

morning glory

17.12.2011

1kWh'lik Enerjinin Santrale Maliyeti;



f: Enerjinin kwh maliyeti

$$f = \frac{M}{W} \quad [TL/kWh]$$

W: Santralin bir yılda ürettiği enerji [kWh]
M: Santrale yapılan yıllık toplam masraf

Masraflar

$$f = \frac{M \rightarrow \text{Yıllık toplam masraf}}{W \rightarrow \text{Yıllık üretim}}$$

$M = M_{TESIS} + M_{URETIM}$

- ↳ değişken masraflar
  - ↳ yakıt masrafları
- → yarı sabit (işletme masrafları) [personel, bakım v.s.]
- → sabit giderler (sermaye giderleri) [santral inşaatı, arsa, donanım vs.]

Tesis Masrafı

$S = a.P_s$

S: Sermaye [TL]
a: Birim tesis masrafı [TL/kW]
P_s: Santral gücü [kW]

$M_{TESIS} = p.S$

p: % Sermaye masrafı (bir yıl boyunca yatırılan, sermaye ile ilgili masraflar)

morning glory

yıpranma (amortisman)

idari masraflar yüzdesi

$p = p_f + p_a + p_t + p_i$

faiz yüzdesi

tamir-bakım yüzdesi

$M_{TESİS} = p.S = p.a.P_s$

Üretim Masrafları

$M_{ÜRETİM} = b.W$

b: 1kW enerji üretmek için harcanan yakıt masrafı

(1kWh=860kcal)

W: Santralin 1 yılda ürettiği enerji

Hu: Yakıtın alt ısı değeri [kcal/kg]

1 kWh enerji üretmek için kullanılan yakıt miktarı

$\frac{860}{\eta . Hu}$ [kg/kWh] x [yakıt masrafı] = b

fy: yakıt birim fiyatı [TL/Ton]

$b = fy . \frac{860}{\eta . Hu}$ [TL/kWh]

morning glory

1 kWh Maliyeti

$$f : \frac{M}{W} = \frac{M_{TESIS} + M_{URETIM}}{W} = \frac{P.S + b.W}{W} = \frac{P.a.P_s + b.P_s.h'}{h'.P_s}$$

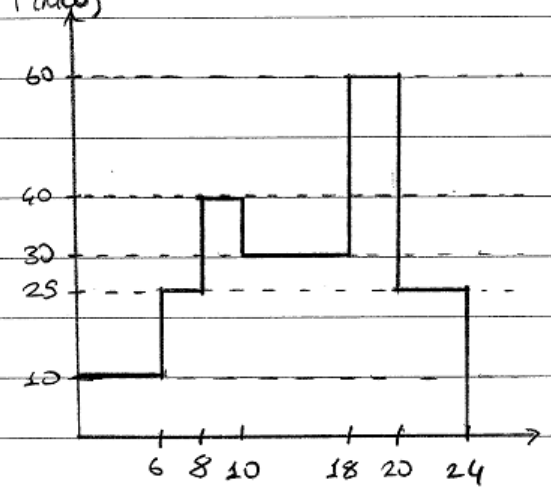
$$f \Rightarrow \frac{P.a}{h'} + b$$

- f → [TL/kWh]
- P : % sermaye masrafı
- a : birim tesis maliyeti [TL/kWh]
- h' → P_s ile işletme süresi
- b : birim enerji üretmek için yakıt masrafı [TL/kWh]

* Hidroelektrik Sant. $\Rightarrow \underbrace{b=0}_{\text{yakıt ücreti söz konusu değil}}$, $f_{sa} = \frac{P.a}{h'}$

Örnek

Puant gücü 60MW olan bir buhar santralinde üretilen enerji günlük yük eğrisinde belirtilmiştir.



birim tesis masrafı ($/kW): 700
sermaye masrafı yüzdesi: %12
yakıt fiyatı [$/ton]: 70

yakıtın alt ısı değeri [kcal/kg]: 5200
verim %35

Bu santral yılda 30 gün süreyle bakıma alınarak devre dışı bırakılmaktadır. Rezerv katsayısı 1,2'dir.

a) Yıllık düzenlenmiş yük eğrisini,
b) Enerjinin maliyet fiyatını bulunuz.

morning glory

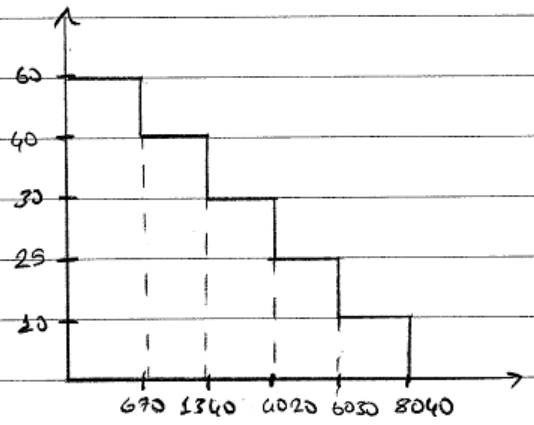
a)

$T = 8760$

$365 - 30 = 335$

$335 \times 24 = 8040$ saat

Güç	Günde	Yılda
60MW	2 saat	670 saat
40MW	2 saat	670 saat
30MW	8 saat	2680 saat
25MW	6 saat	2010 saat
10MW	6 saat	2010 saat
		8040 saat



b) $f = \frac{a \cdot p}{h'} + b = \frac{a \cdot p}{h'} + fy \cdot \frac{860}{\eta \cdot Hu}$

$h' = \frac{W}{P_s}$

$P_s = c \cdot P_p$

$P_s = (1,2) \times 60 = 72$ MW

$W = 60.670 + 40(1360-670) + 30.(4020-1340) + 25.(6030-4020) + 10.(8040-6030) = 217750$ MWh (yıllık toplam)

$h' = \frac{217750 \times 10^6}{72 \times 10^6} = 3024,3$ saat

↳ (sayı miktarda enerjinin verilebilmesi için santral gücü ile çalışma süresi)

$f = \frac{700 \times (0,2)}{3024,3} + \frac{860}{(0,35) \times 5200} + 0,06 = 0,056126$ [$/kWh]

↳ [$/kg] çevrildi

morning glory