

Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering



RENEWABLE ENERGY

יום ג' 17 – 20
סמסטר ב'
2007

Alon Kuperman, Ph.D., MBA

אוניברסיטת
בן-גוריון בנגב
Ben-Gurion University
of the Negev

Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

RENEWABLE ENERGY

www.ee.bgu.ac.il/~alonk/RE

alonk@ee.bgu.ac.il

08-6475745

אוניברסיטת
בן-גוריון בנגב
Ben-Gurion University
of the Negev

Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

RENEWABLE ENERGY

<http://ieeexplore.ieee.org>

<http://www.lipower.org/cei/>

<http://www.aresearchguide.com/energy.html>

<http://www.renewable-energy-world.com/>

<http://www.arch.hku.hk/research/BEER/renew.htm>

<http://www.eere.energy.gov/>

<http://home.clara.net/darvill/altenerg/>



Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

RENEWABLE ENERGY

Wind Power

Solar Power

Hydro Power

Biomass

Geothermal

Hydrogen/Fuel Cells

Wind – Diesel

Solar - Diesel



Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

RENEWABLE ENERGY

השבבות שיאירו את תל-אביב

ועדה של הכנסת מציעה להקים בתוך הים חוות טורבינות לייצור חשמל, שגובה כל אחת מהן 100 מטר

חלום יעקב
שלא יאמרו כמו
ההמצאה של מרדוך

בניין לקוות שיוחזקו של חבר הכנסת אלכס מילר לא תהיה לגיטימית היחידה של יחידת הפקה חשמלית חבולתית נתפסת, קליה ובריו חבר הכנסת יעקב מרדוך ב-28 מיוני 1981.

מרדוך, שהיה מבכירי רשימת הליכוד בכחידות לכנסת העשירית, ריחף על המצאת המאה מתוך לייצור אנרגיה, שבאמצעות גורם גרילה אתה יכול להפיק את כל החשמל, במספר של דבר התגברת ההצעה ככלי אחד גדול, דני ברנס, נוכח בעל עבר פוליטי, הוליד שלול את מרדוך והפך את החזון שלו לבידחה, אבל בניגוד לגורם של מרדוך, טורבינות רוח לייצור חשמל הוכחו את עצמן בטורבינות רבות בע"לם, ואשילו ברשת העולל מפעלת חוות טורבינות קטנה סמספקת חשמל למפעלים באזור.

אריק בנדר

זה נראה אולי כמו פנטזיה, אבל בבטחה בטורבינות מסיב ארוכות זו כבר מציאות וק"ר משה של ועדת המדע של הכנסת, בראשה וי של חבר הכנסת אלכס מילר מישראל מיתג, ממליצה להקים בתוך הים מול תל-אביב חוות של טורבינות רוח ענקיות, שיפסקי חלק גדול מהצריכה החשמל של מדינת ישראל.

מדובר בטורבינות בגובה של 100 מטר כל אחת, והעצירות שלהם בקוטר 72 מטר. הן יבנו במרחק של כשני קילומטרים מהחוף, על תשתית שתבנה מתחת לפני המים בעומק של כשמונה עד עשרה מטרים. חבר הכנסת מילר רואה בחזונו חוות של לפחות 100 טורבינות כאלה, שיספקו כ-500 מגוואט חשמל.

ד"ר אילון קופרמן מאוניברסיטת בן-גוריון בנגב, הידוע המדען של הועדה, אמר כי צריך שתחשלב של תל-אביב הוא כ-7000 מגוואט כשמטען לשנה. תחת הכותר דריג מספקת כי 500 מגוואט, וחוות של כ-100 טורבינות רוח יכולה להסלים את החסר ואף לייצר עודפי חש"ל. לדבריו, 80 אחוז ממסך החשמל של רמת-גמס על יד אלפי טורבינות ענק המוצבות בלב ים, אלא שבנים הצפוני הוות חוקר יותר מאשר בחופי ישראל.

חוות כמו זו קטנו מדברים קליה יכולה לספק חשמל ללא קושי בסדר גודל של כ-50 אלף תושבים, אומר ד"ר קופרמן, "היתרונות הגדולים שלה הם ניקיון, שכן טורבינות רוח לא מזהמות את האוויר ואת הסביבה וחסכון, מכיון שהיא מנגלת אחרי שהיא משאב שאינו נגמר ועצמאות כלכלית, כי היא מקטינה את העלות של מדינת ישראל".

חבר הכנסת מילר ציין כי קלות הקמה תה של חוות הטורבינות בגובה מורד, אך היא מחוירה את ההשקעה בתוך מספר שנים. "ישראל נמצאת במעט במ"ס האחרון בעולם בייצור אנרגיה חלול, פיתח הכיור מילר "למדינה כמו שלנו התלויה במקורות אנרגיה חיצוניים, יש חשיבות עצומה בפיתוח מקורות אנרגיה חלופיים. כיושב ראש ועדת המ"ש שנה שעברה בעניין זה אני מתכוון לרוחח חוק את הדין, ולכנס בקרוב דיון עם כל הגורמים הנוגעים בדבר כדי להכין רוח המלצות שיוגש לשר התשתיות ולממשלת ישראל".

באירופה זה שובר. חוות טורבינות ברוחלנד צילום: א.א.

Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

RENEWABLE ENERGY

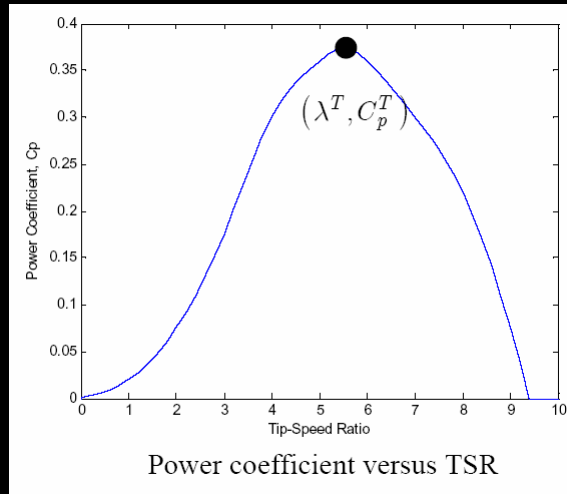
The power captured by a fixed-pitch wind turbine

$$P_t(V_w) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p V_w^3,$$

where

- ρ air density (kg/m^3)
- C_p power coefficient of wind turbine
- V_w wind velocity (m/s)
- R blade radius (m).

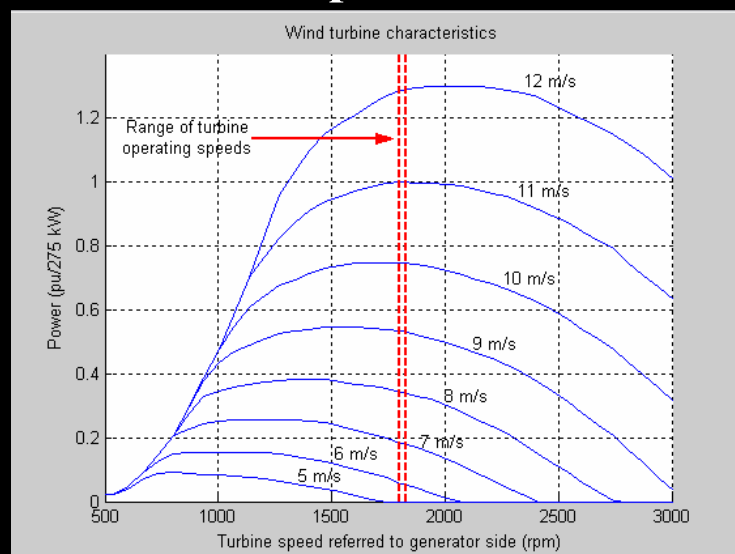
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
Ben-Gurion University of the Negev



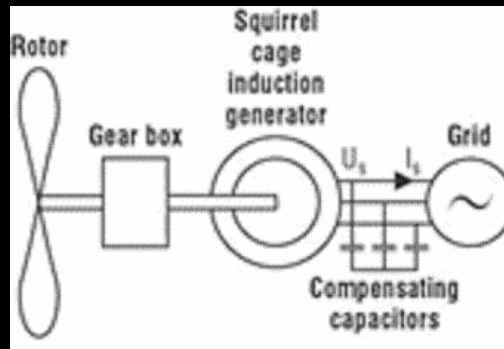
$$P_t(V_w) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p V_w^3$$

The TSR is given by $\lambda = \frac{\omega_t \cdot R}{V_w}$

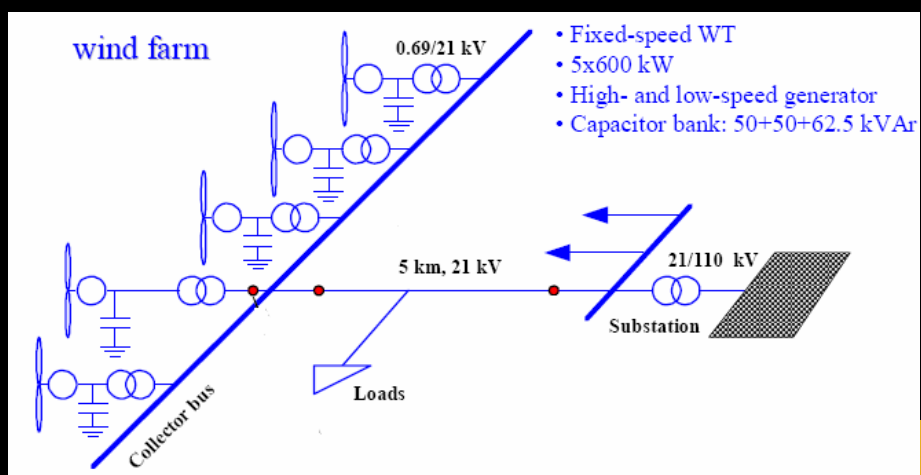
Fixed-Speed WT



Fixed-Speed WT



Fixed-Speed WT



Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

Variable-Speed WT

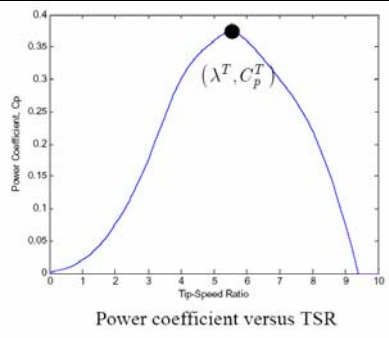
The TSR is given by $\lambda = \frac{\omega_t \cdot R}{V_w} \longrightarrow V_w = \frac{\omega_t \cdot R}{\lambda}$

$P_t(V_w) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p V_w^3 \longrightarrow P_t(\omega_t) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p \left[\frac{R}{\lambda} \right]^3 \omega_t^3$



Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

Variable-Speed WT



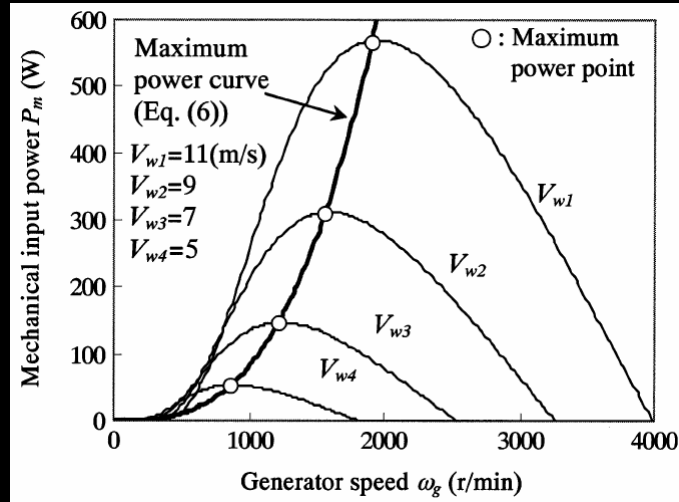
Power coefficient versus TSR

The TSR is given by $\lambda = \frac{\omega_t \cdot R}{V_w}$

$\lambda^T = \frac{\omega_t^T \cdot R}{V_w}$

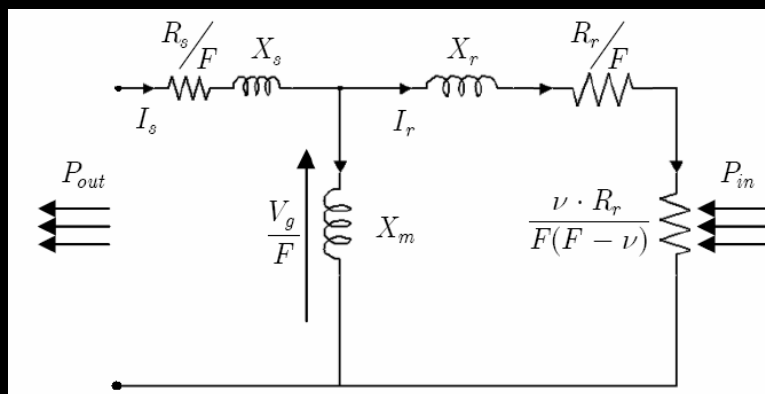
$P_t(\omega_t) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p \left[\frac{R}{\lambda} \right]^3 \omega_t^3$

$\max(P_{in}) = P_t^T(\omega_t) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p^T \left[\frac{R}{\lambda^T} \right]^3 \omega_t^3$



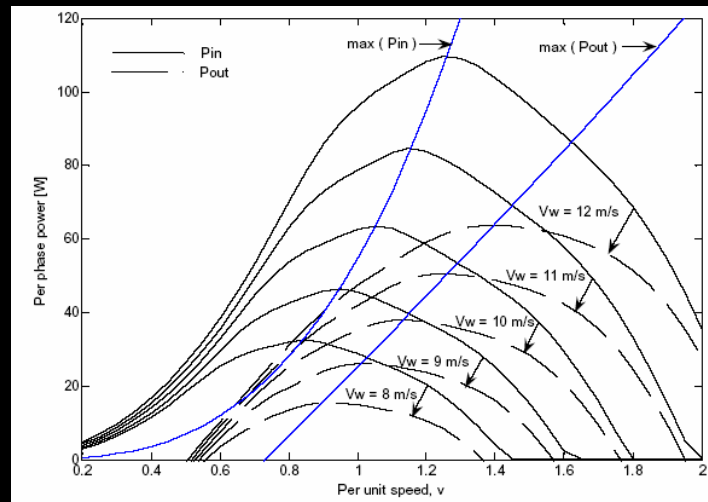
$$\max(P_{in}) = P_t^T(\omega_t) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p^T \left[\frac{R}{\lambda T} \right]^3 \omega_t^3$$

Variable-Speed WT

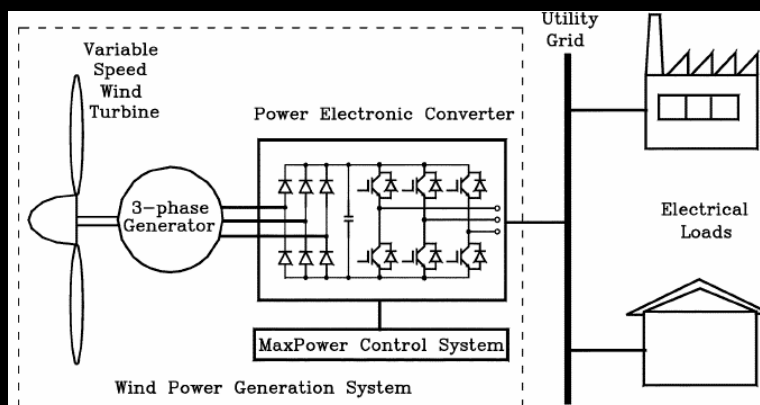


Per Phase equivalent circuit of the IG

Variable-Speed WT



Variable-Speed WT



Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

Variable-Speed WT

The diagram illustrates the power flow in a variable-speed wind turbine. Wind speed V_w enters the turbine, creating torque T_w and angular velocity ω_w . These are transmitted through a gearbox (containing torque T_m and angular velocity ω_g) to a generator G (outputting torque T_g). The mechanical input power is P_m . The generator produces AC output power P_{ac} with voltages u, v, w . This AC power is fed into a Power Converter & Controller, which outputs DC output power P_{dc} at voltage V_{dc} . The DC power can be used as a DC load or sent to an Inverter → Grid.

$$T_m = \frac{T_w}{G}, \omega_g = G \omega_w$$

אוניברסיטת בן-גוריון
Ben-Gurion University of the Negev

Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

Variable-Speed WT

The diagram shows a grid-connected DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) wind turbine. Wind enters the turbine, which has a Pitch mechanism. The wind is captured by the blades and transmitted through a Gearbox to the DFIG. The DFIG is connected to a Rotor-side converter (AC/DC) and a Grid-side converter (DC/AC). The Rotor-side converter is connected to the DFIG's rotor. The Grid-side converter is connected to the DFIG's stator and the Grid. A Control block manages the operation of both converters.

A grid-connected DFIG wind turbine

אוניברסיטת בן-גוריון
Ben-Gurion University of the Negev

RENEWABLE ENERGY

The acceleration and deceleration of the generator rotor speed is described by the following equation

$$(J_g + \frac{1}{G^2} J_t) \dot{\omega}_g + D \omega_g = \frac{1}{G} T_t - T_g ,$$

where

J_g generator inertia

J_t turbine inertia

G gear ratio

T_t turbine torque

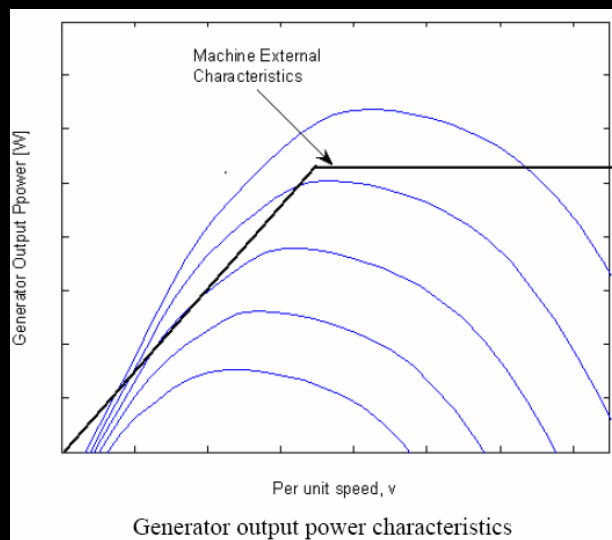
T_g generator torque

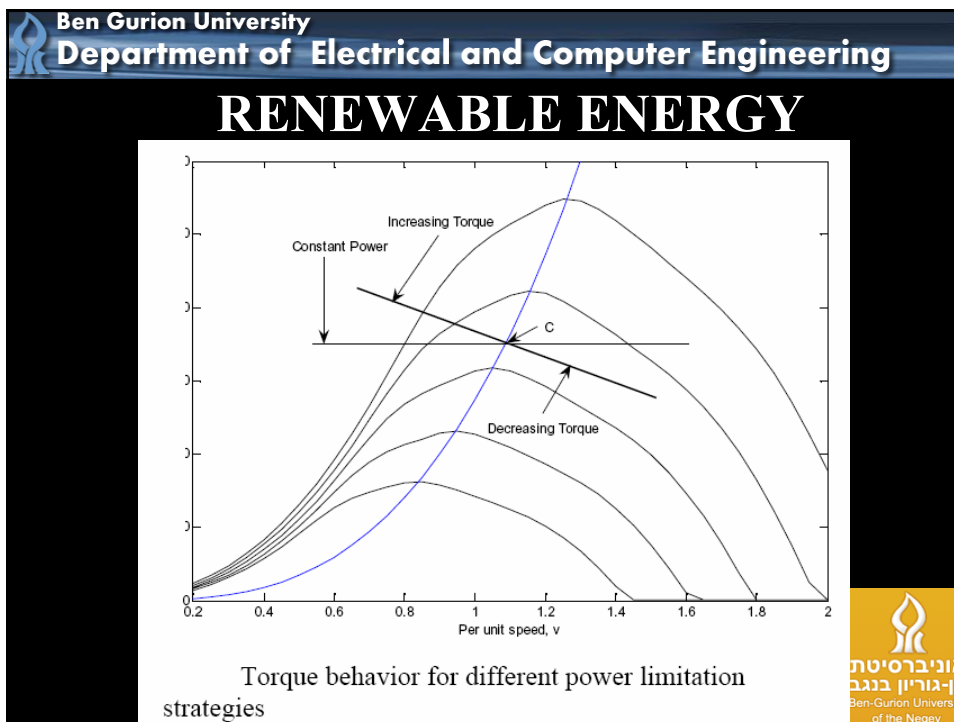
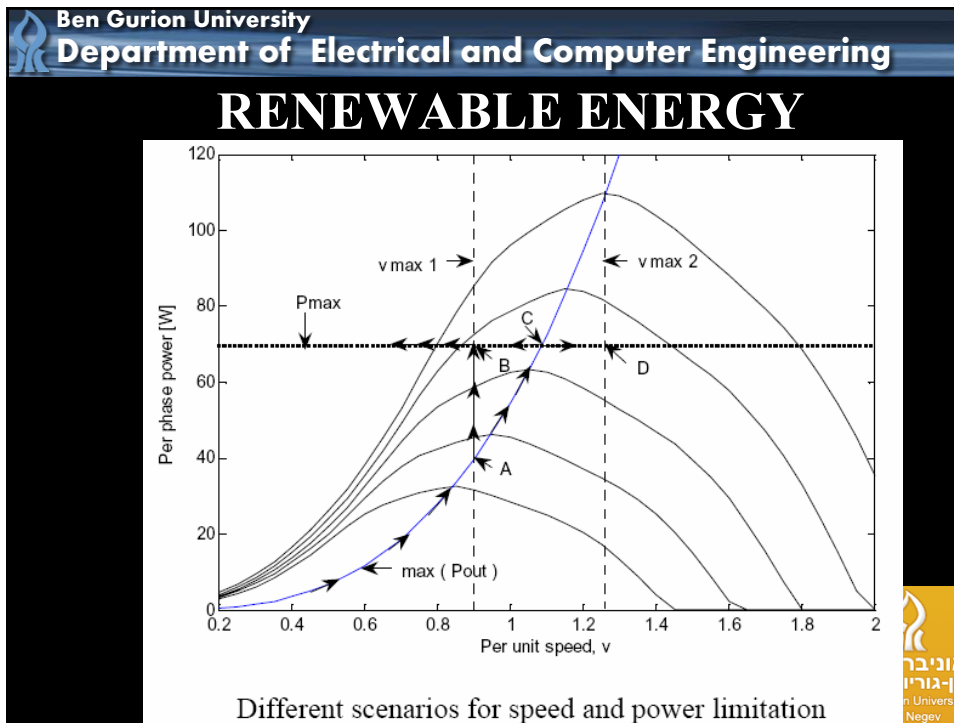
D damping constant.

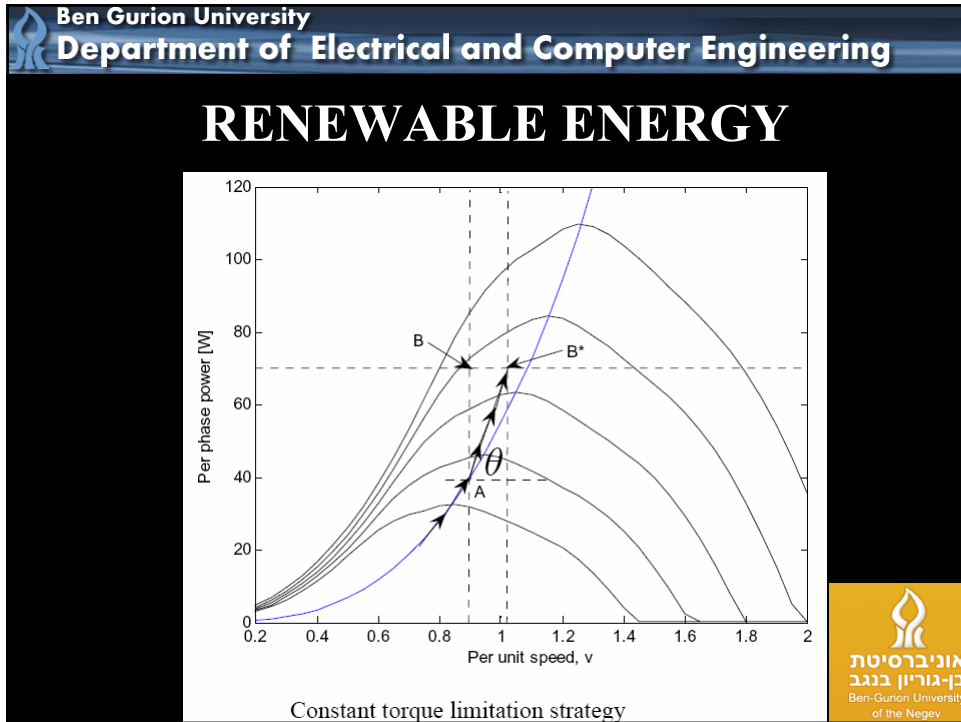
The turbine torque is given by

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} .$$

RENEWABLE ENERGY







Ben Gurion University
Department of Electrical and Computer Engineering

RENEWABLE ENERGY

End of lecture 3

אוניברסיטת בן-גוריון
Ben-Gurion University of the Negev