

Στιγμές από ένα ταξίδι στην Ανάλυση της Δυναμικής Συμπεριφοράς των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Κώστας Βουρνάς
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

vournas@power.ece.ntua.gr



Σύνοψη

- Κάθε ταξίδι έχει μια αρχή
 - και κάποιους Μέντορες
- Η αναζήτηση του χαμένου κρίκου
 - Είναι η «στατική» ευστάθεια γωνίας ευστάθεια τάσεως;
- Power Tech και Συμπόσια του IREP
- Η Ευστάθεια Τάσεως
- Έρευνα σε εξέλιξη...

ΕΜΠ 1970-1975

- Σχολή Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων
- Χωρισμός στο 2^ο έτος (Ηλεκτρολόγος)
 - Επιλογή κατεύθυνσης στο 4^ο έτος
 - Ενεργειακός Ηλεκτρολόγος
 - Με ενδιαφέροντα στον Αυτόματο Έλεγχο
 - που μάθαμε από την Ανάλυση Δικτύων
- Διπλωματική στη Γενικευμένη Θεωρία Ηλεκτρικών Μηχανών
 - Με εφαρμογή στην ανάλυση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων...

MSc: University of Saskatchewan

- Σταθεροποιητής ΣΗΕ
 - Multivariable Stabilizer for a Multimachine Power Plant
- Prof. Ron Fleming (επιβλέπων)
- Έλεγχος ΣΗΕ
 - Μοντέλα Στροβίλων-Ρυθμιστών
 - Μοντέλο Σύγχρονης Μηχανής (Heffron-Phillips)
- Γενίκευση Μοντέλου H-P:
 - Συντελεστές K γίνονται πίνακες M



Πίνακες M

- Διαγώνια στοιχεία: συντελεστές K
- Μη διαγώνια αναπαριστούν αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανών
- Για γεννήτριες στον ίδιο σταθμό (MSc)
- Για όλο το σύστημα (διδακτορικό)

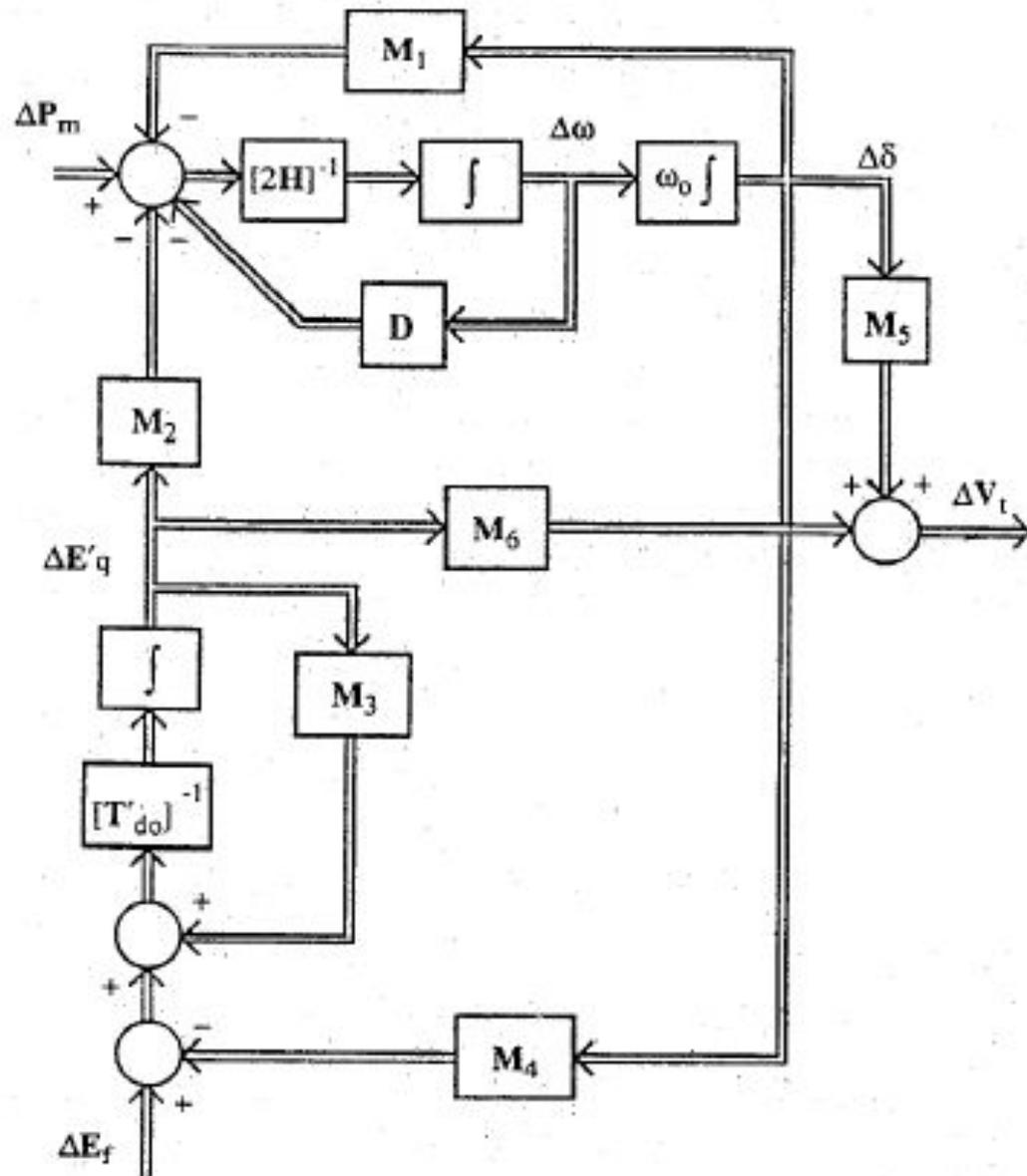


Figure 2: Multimachine linearized model

Πίσω στο ΕΜΠ

- Καθηγητής Β. Κ. Παπαδιάς
- Διδακτορική διατριβή:
 - Βελτιστοποίηση δυναμικής ευστάθειας ΣΗΕ με ρύθμιση διατάξεων ελέγχου
 - Ελαχιστοποίηση πραγματικού μέρους ιδιοτιμών
 - Δίνει λύσεις, αλλά οδηγεί κοντά σε συντονισμούς (Ian Dobson)
- Athens Power Tech 1993
 - Μας έφερε σε επαφή με τον Κόσμο
 - Η σειρά συνεχίζεται (Βελιγράδι 2023)
 - Βραβείο Παπαδιά (από το 2003)



C. D. Vournas and B. C. Papadias, "Power System Stabilization via Parameter Optimization - Application to the Hellenic Interconnected System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-2, No. 3, Aug. 1987, pp. 615-623.

Sabbatical στο UIUC (1994-95)

- Pete Sauer and M. A. Pai
- Ευστάθεια Τάσεως και Γωνίας
- Σύγχρονη Μηχανή με APT
 - Ευσταθής και πάνω από τις 90°
 - Δεν υπάρχει μηδενική ιδιοτιμή, μόνο ταλαντωτική αστάθεια
- Περιοριστές Υπερδιεγέρσεως
 - Σταματούν την APT
 - Ακολουθεί αστάθεια τάσεως
- Δεν υπάρχει «στατική» ευστάθεια «γωνίας»



Power System Dynamics
and Stability

Peter W. Sauer
M.A. Pai

C. D. Vournas, M. A. Pai, P. W. Sauer, “The effect of Automatic Voltage Regulation on the bifurcation evolution in power systems”, IEEE Trans. PWRS-11, Nov. 1996, pp. 1683-1688

C. D. Vournas, P. W. Sauer, M. A. Pai, “Relationships between Voltage and Angle Stability of Power Systems”, Int. J. of Electric Power and Energy Systems, Vol. 18, No. 8, Aug. 1996, pp. 493-500

“Missing Link”

- Μεταξύ ευστάθειας γωνίας και τάσεως
- Μηχανή - Άπειρος Ζυγός
 - Κυλινδρικού δρομέα με σταθερή διέγερση
 - Στις 90° (SNB) η γεννήτρια παραμένει σε συγχρονισμό λόγω μεταβατικής ΗΕΔ
 - Δεν μπορεί όμως να διατηρήσει μαγνήτιση και η μεταβατική ΗΕΔ μειώνεται
 - και τότε μόνο χάνεται ο συγχρονισμός (LOS)
- Προκάλεσε συζητήσεις...

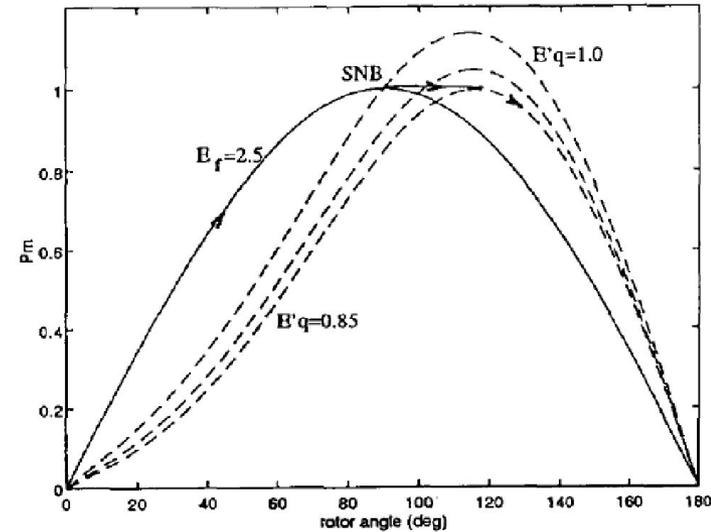
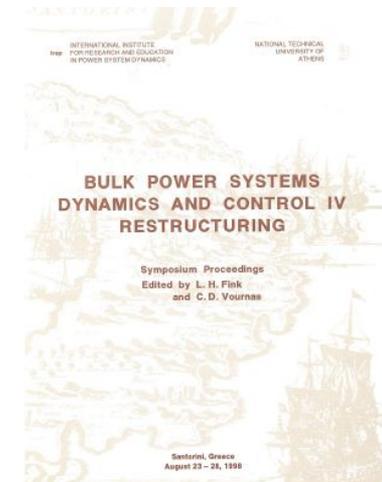
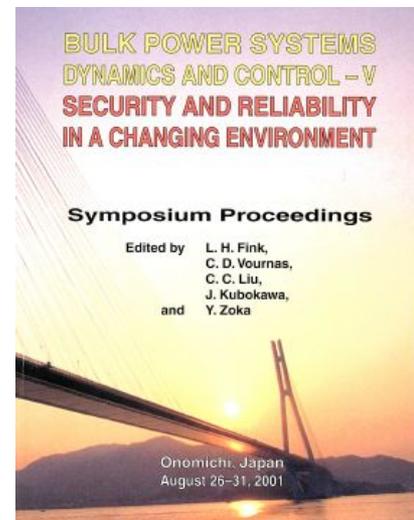
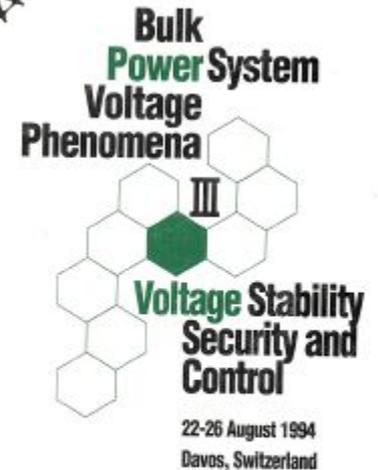


Figure 1. Steady state and transient power-angle curves

Bulk Power System Dynamics and Control

Symposia

- Lester Fink
 - Davos 1994
 - Voltage Stability
 - Ίδρυση IREP
- Santorini 1998
 - Restructuring
- Νέα Θέματα
 - Security
 - Optimization
- Συνεχίζεται...
 - Rethymno 2013
 - Porto 2017
 - Banff 2022



Ευστάθεια Τάσεως



• «Ανέβηκα στο τρένο» στο Davos

- C. D. Vournas, “On the modelling of collapse in dynamic Power System Voltage Phenomena - Voltage stability and...” Davos, Switzerland, Aug. 1994, pp. 157-168.

• και ξεκίνησε η συνεργασία με τον Thierry Van Cutsem

- T. Van Cutsem, C. D. Vournas, “Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-Term Time Scales”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRS-11, February 1996, pp. 146-152
- T. Van Cutsem, C. Vournas, “Voltage Stability of Electric Power Systems”, Kluwer Academic Publishers 1998, Springer 2008, Translation PHEI, 2009

• Ανάλυση και Χωρισμός Χρονικών Κλιμάκων

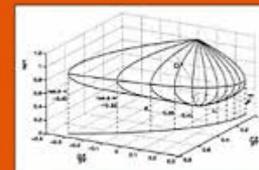
• Συστηματική παράσταση πραγματικού συστήματος

- Δίκτυο, Γεννήτριες (κορεσμός, περιοριστές), φορτία

• Παρακολούθηση Ευστάθειας σε πραγματικό χρόνο

VOLTAGE STABILITY
OF ELECTRIC
POWER SYSTEMS

Thierry Van Cutsem
Costas Vournas



Power Electronics and Power Systems Series

Μερικά διδακτορικά (και κάμποσες διπλωματικές) αργότερα...

- George Manos, “Analysis of dynamic phenomena in the process of Voltage Instability and Collapse”, 1998, “ELLINIKI TECHNODOMIKI ANEMOS SA”
- Basil Nomikos, “Systematic Design of Power System Stabilizers for Power Systems with Synchronous and Induction Machines”, 2005, ΑΔΜΗΕ
- Michael Karystianos, “Secure Power Transfer Limit Optimization”, 2005, ΑΔΜΗΕ
- Emmanuel Potamainakis, “Power System Simulation and Linearization for Short-term Voltage Stability Analysis”, 2006, PROTERGIA
- Demetrios Simopoulos, “Optimization of Short-term Electric Power Generation Planning with Simulated Annealing Method”, 2006, PROTERGIA

Μερικά διδακτορικά (και κάμποσες διπλωματικές) αργότερα...

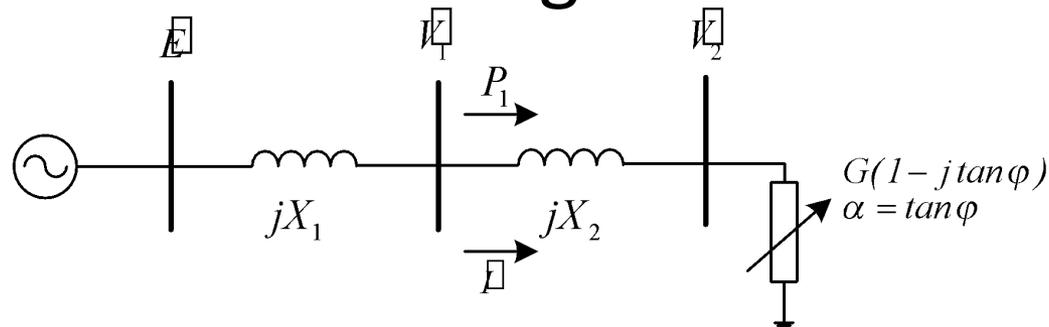
- Vassileios Nikolaidis, “Power System Protection Design for Long-Term Voltage Instability”, 2007, Επικ. Καθηγητής ΔΠΘ
- Georgios Tsourakis, “Wind Penetration Contribution to Power System Stability”, 2010, ΑΔΜΗΕ
- Nicholas Sakellaridis, “Nonlinear Dynamics Applications in Voltage Stability Analysis”, 2010, ΔΕΔΔΔΗΕ
- John Mantzaris, “Quasi-Steady-State Modelling of Large Interconnections and Stabilizer Design for Interarea Oscillations”, 2012, ΑΔΜΗΕ
- Charalambos Lambrou, “Design of Voltage Instability Detection Systems and Protection against Voltage Collapse”, 2017, Τράπεζα της Ελλάδος
- Theodore Souxes, “Use of Wind Farm Converters to Enhance Power System Voltage Stability”, 2019.

...το ταξίδι συνεχίζεται

- Παρακολούθηση Ευστάθειας από μετρήσεις
 - LIVES (παρακολούθηση τάσης ΣΑΤΥΦ)
 - Προεκτάσεις (μέτρηση $\Delta P/\Delta G$)
 - New LIVES Index (NLI: υλοποίηση σε PMU ζυγού ΣΜ)
 - Relay LIVES Index (RLI: patented for transmission line relay operation)
 - Ξεπερνάει τις αδυναμίες μεθόδων Thevenin
 - Σε ενδιάμεσο ζυγό ή γραμμή μεταφοράς
 - Διδακτορικό Πάνου Μανδουλίδη (εγκρίθηκε 17/12/21)
- Χρήση διεσπαρμένων πηγών
 - Για μεγιστοποίηση περιθωρίου ευστάθειας
 - Διδακτορικό Γιώργου Πριονιστή (σε εξέλιξη)

Παρακολούθηση Ευστάθειας Τάσεως

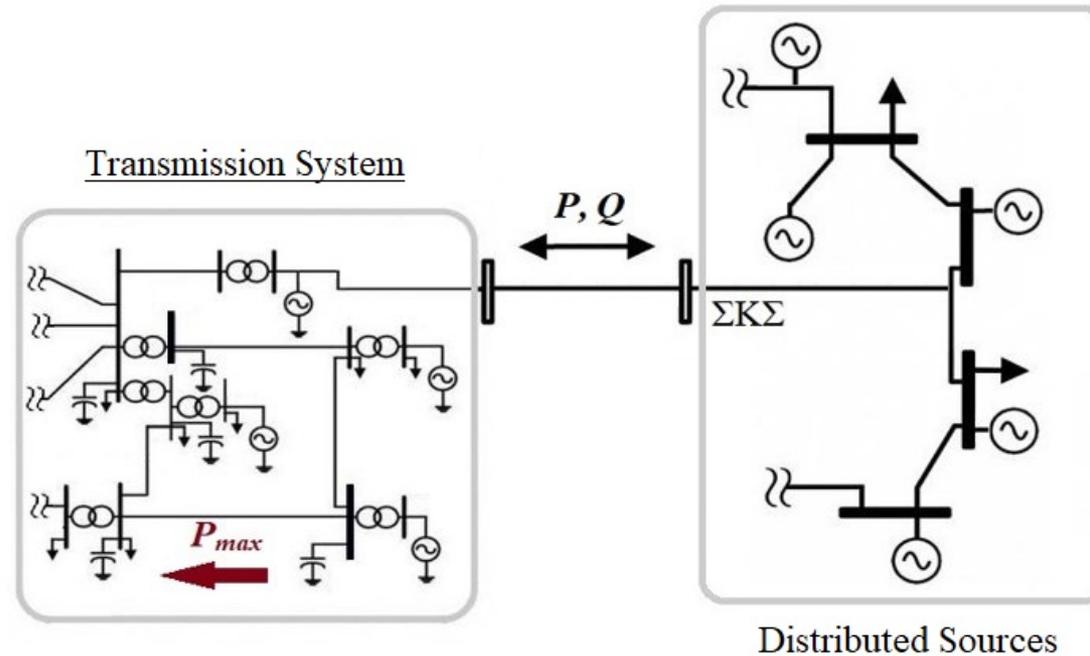
- Με βάση μετρήσεις (PMU ή relay)
- Impedance matching limitations



- “προσαρμογή αντιστάσεων” $Z_{app} = V/I = X_1$
- stability condition $Z_{load} = X_1 + X_2$
- Παρακολούθηση $G_1 = \text{real}(I/V)$ και P_1
- Όταν $\Delta P / \Delta G > 0$
 - αύξηση ζήτησης, αύξηση ισχύος (Ευστάθεια)
- Εάν $\Delta P < 0$ για $\Delta G > 0$ Συναγερμός (Alarm)!

Μεγιστοποίηση Περιθωρίου Ευστάθειας

- Πεπερασμένη ισχύς μεταφοράς (P_{\max})
- Σε κατάσταση ανάγκης (emergency)
 - Προσαρμογή P , Q στο ΣΚΣ (Active Distribution Grid)
 - Με βάση ανταλλαγή πληροφορίας από ΚΕΕ
 - Εξασφαλίζοντα



...προς το μέλλον

- Λιγότερες μεγάλες σύγχρονες μονάδες
- Μεγαλύτερη αβεβαιότητα και κόστη
- Πληθώρα μικρών διεσπαρμένων πηγών
 - Με δυνατότητες ελέγχου Q και P (αποθήκευση)
- Μετάβαση από Κεντρικό σε Διανεμημένο
 - Έλεγχο (Ρύθμιση) και Βελτιστοποίηση
 - Πολύ-επίπεδη ανάλυση (διανομή-μεταφορά-περιφερειακά κέντρα συντονισμού)
- Προς ένα Νέο Υπόδειγμα Διανεμημένου Ελέγχου και Λειτουργίας ΣΗΕ