t_j ' min{ $t_{j,\text{step}}$ $t_{j,0}$ $\tilde{t}_{j,\min}$} (15)

ã $t_{j,\text{step}}$ ¬ _ < ê/Ï,Ì <,X!9KS × ¬k_t <
¬!¨ ê/Ï,Ì <,Ì?¦,X Ô û { !9 D È ª 3 ê 4 Ä à
)Ú È Í b ¥+ 0Ã+ _,XA× H ÈLÔ$µC‡

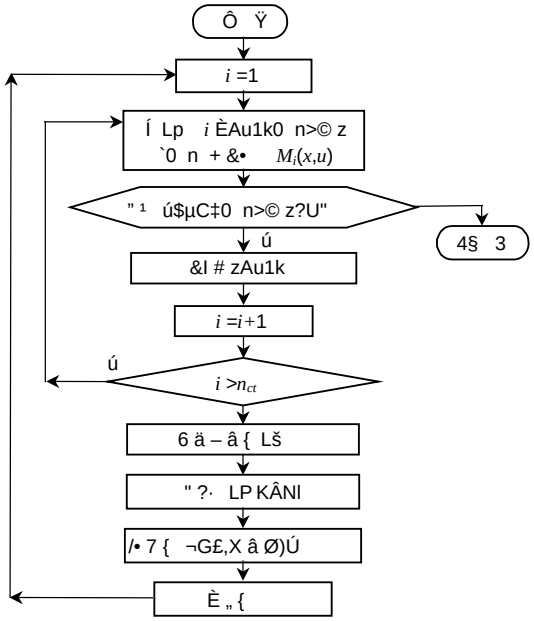
V_{gj} ' min{ V_{ad}, $V_{gj,\max}$ $V_{gj,0}$} (16)

V_{gj} ' min{ V_{ad}, $V_{gj,0}$ $V_{gj,\min}$} (17)

ã 'V_{ad} A' n,X Ô û { G£ È [ª 0.03Ä–
D 'V_{ad} ` k_t îLc-è0J2Ï4³,X á à5à á à ÄG›*üE- Ô
1*+9 â È Ã ¹ G£ S k!£ õEÁ ·,XA× HG£ á î þ û
5àE°E°CYE› J4“ û Ý KÈ È5à ß Ô õEÁ · W ú
– â { È í ª ‡ b W ß Ô õ,X&I # z û ã Ä

4 1k"©

[¤ Î,X ü4“M- Õ0 n r { 1k"©,X#
/ß V Ò1 / Ä ü ;> r { s6Ñ ! È?U ;
> Lp,X1/EÝ ` f c s6Ñ È k Ô þ ùG¡ LpLš Ä
Í!£ Ô þ ùG¡ Lp ÈG›*üKÈ y •"©Aš ÿ `Au1k k
0 n + &• È Í J 0 n>© z á$µC‡,X Lp ÈAu1k
J { &I # z Ä Ò 1 ,Õ • Z!£ õ È „ { â È?U
Í { â2Ï4³E¯> %B# Au1k È ¹ " ¹ ú ÝE¤> 4z
3C^L$ È JAu1k J,Ì h,X&I # z Ä5à ü4§ 3 ø B
3 Ù ÿ ÝE¤> 4z 3FÑ$µC‡,X?U" Ä ' Ý ùG¡
LpFÑAu1k ` â È B&I # z µ C 9EÝ ½ – â {
Lš Ä5à â?U" ?· 6 ä,X4“ û?˜ æ { $KÂNl È k
?· â È Í J ,X/• 7 { ¬G£ V ¬ _ < Ú y 1 E¯
> /• 7 ê Ø)Ú Ä Ô â Í2Ï4³,X { E¯> È „ Ä
LÔ?U Û Î,X È [¤1k"©A© Ò?· ‡ ü0 n



Ò 1 M- Õ0 n r { ,X# /ß Ò
Fig.1 Flow chart of enhancement control

r { • ç Î)„,X ø þKÂNl Ä Ô á à LpKÈ
,X { • å,Ì ‰?º,XKÂNl × ` ‘ t r { â2Ï
4³E¤> 4z 3C^L$,XKÂNl Ä G£ Ú W À ü Ô þ LPKÂ
Nl 4³ Ô" ?· È A}LP } R Ô þ l>K,X { • Ä
á ™EÝ ½ á$µC‡>© z?U" ,X ùG¡ LpE¯ 9LP ÈE¬ h
EÝ ½ åG£ î î$µC‡>© z,X LpE¯ 9 Ä!8 ê È ü4z 3
ã (11) ` ã (12) È3?U t 92O 4z 3 ã (7) ,X>9 S
´ $ È ¹ G£FS !+ b/• 7 ê Ø)ÚEô ä •K)„B5 Ä

5 1k _ Ú d

E¤*ü ÞEÄ Î b&I # z `4“ û?˜ æ T ,XM- Õ
0 n r { •"© È Í5b Ñ ðF¼ Ô þ 3000 8V&• r
L 2Ï4³E¯> Z D A©P` Ä2Ï4³ E Ý 312 þ ¬ _ <
Ú y Ä ü>< ¹ LTC ></ ÅÃ 19 þ/Ï,Ì < Ã 361
Ä ¥+ ,X Ý s Ä ¹ G_P></ ÅÃ 361 þ 0Ã+ _
Ä ¹ G_V></ Å ` 1550 þBó9K Ã ¹ – â { Ä
><1~2 Ú ÿ4- Î ZA¹2Ï4³ ü ¤ ø þ ÊKÈ •M6,X
ùG¡ Lp ž J r { E›/ß Ä>< D +FÑ 0 n>©
z È) ! MW Ä ™ 6 1 ` ™ 6 2 ,X Ô ã0 n>© z
?U" Ú ÿ 800MW ` 500MW Ä Í Ô þ Lp È
Ú ÿ ª&I # z Ô û,X 10 þ ¬ _ < Ú y Ã 5 þ/Ï,Ì
< Ã 10 Ä ¥+ Ý s Ã 10 þ ¥+ 0Ã+ _ ` 5
þ LBó9KE¯ 9 – â { Lš Ä – â { Lš Ã ¹Lc-
EÁ ·5à È „ ¬ ê È 3 Ã ¹ á È „ ê5Ù ¾ r t á £
å1 Ä Î b G£ £ å Ô â?·,X { D,Â5×<% ÈE-G
G›*ü Z ¾ r t á £ å,X1*+9 Ä [1k _ Ý þ ì
4{,X { ´ $,X ª !¨ 3:4:10È Ý { ¬
G£,X ä 2Ï DFÑ ª 1.0 Ä>9 S ´ $ ª 1.03Ä

><1 ùG¡ Lp ž J r { E›/ß Ä ™ 6 1 Å
Tab.1 Severe contingencies and enhancement control process (Case 1)) ! ÖMW

Lp4ê Ë	{ !	EÁ · 1	EÁ · 2	EÁ · 3
C929	205.22	495.12	729.84	807.59
C1060	258.20	518.50	781.43	833.72
C1068	833.19	940.45	1023.11	1049.57

><2 ùG¡ Lp ž J r { E›/ß Ä ™ 6 2 Å
Tab.2 Severe contingencies and enhancement control process (Case 2)) ! ÖMW

Lp4ê Ë	{ !	EÁ ·	EÁ ·	EÁ ·	EÁ ·
C1976	96.16	314.06	385.76	490.71	509.39
C1062	127.00	357.18	412.25	516.46	529.08
C1055	324.33	433.14	496.37	588.29	598.59
C360	356.88	569.60	632.94	742.62	759.41
C1052	357.75	483.75	550.67	646.80	659.93
C930	394.06	589.17	680.49	793.52	809.44
C355	420.79	575.25	638.93	726.50	739.99
C361	418.46	627.76	704.67	793.97	813.59
C359	439.67	643.64	709.48	823.14	840.67
C374	505.10	696.30	744.12	854.39	867.55

"¼ Ö><1 Ã2 tT¥,X D + á$µC‡0 n4z 3G£ Ä

¢>< 1~2 Ã ¹,ß Î È1k"© ü \ å,XEÁ · õ D Y G Ã / Ä à Ê ÈLc- { E›/ß È Ý Lp,X0 n>© zFÑ ü à å r t È J"u Ý £ å,X)„B5 ¥*ó Ä>< 3 `>< 4 Ú ÿ4- Î Z ™ 6 1 ` ™ 6 2 üEÁ ·" ?·E› /ß ,X Ø/¡ { 2O _,X { D,Â Ä – âLš></ Oj õ EÁ ·,X – â { D,Â È Ô â?·,X { D,Â J á1 b !£ õEÁ ·,X D,Â ` È´ AŒ î { >•G¡ áEÝ ,X Ä+ >< Ã-¹ È<Q' <2Ï4³,X { D,Â \ û È E¯ 94“ û?˜ æ,X { D,Â J á û Ä>< 3 `>< 4 Ô â Ô> 34- Î Z!£ õEÁ · + _C^L$,X8V&• þ D È À Ë ,X D + rL t 9 LP ,X4z 3 þ D Ä´ !£ õ ¾EÝ ½ J CK Ð 0*ü,XC^L$4z 3E¯ 9LP È5à V Ê Ñ+9 J ª4z 3 Ä+ b"u Ý CÃ&Á4z 3C^ L$ È á a ë Î Ä Í b!£ þ é 9,X+ _4z 3 È Ú ÿ r t 3 þ Ô&I #,X LTC { ` G_V { E¯ 9 – â { Lš Ä

><3 r { E›/ß ë>< Ä ™ 6 1 Å

Tab.3 Process of the enhancement control (Case 1)

{ 2O _	– âLš	EÁ ·1	EÁ ·2	EÁ ·3	Ô â?·
LTC	24	13	8	4	12
/ï,Ì <	7	2	3	1	3
G_P	13	3	3	0	5
G_V	15	10	4	1	12
LBó9K	9	0	0	0	0
Au	68	28	18	6	32
+ _C^L$ þ D	#	5(2)	3(2)	0	0

><4 r { E›/ß ë><(™ 6 2)

Tab.4 Process of the enhancement control (Case 2)

{ 2O _	– âLš	EÁ ·1	EÁ ·2	EÁ ·3	EÁ ·4	Ô â?·
LTC	29	9	3	4	2	11
/ï,Ì <	8	0	0	0	0	0
G_P	31	0	0	0	0	0
G_V	25	7	2	0	1	7
LBó9K	14	0	0	0	0	0
Au	107	16	5	4	3	18
+ _C^L$ þ D	#	9(4)	4(2)	3(2)	0	0

¢Au1k ÊKÈ Þ Ú d È ?U *üE²4Á%B# " ?·0 n + &•,XAu1k ÊKÈ È&I # z `4“ û?˜ æAu1k \ ¿ Ä) þE²4Á%B# Au1k ÊKÈ â) þ%B# Au1k ÊKÈ,X G !¨ 7.5!¨ 1ÄG›*ü Pentium 4 2.8G CPU, 1G Y ,G!5B,X , È™ 6 1 ,X <F¼Au1k ÊKÈ4z 12sÈ ™ 6 2 ,X <F¼Au1k ÊKÈ4z 56sÄ5×<% ,Â ! EMS + _0 nA˜ â { s6Ñ,X ü4“ h*ü" G ÈEî | < ó 5~15minÈ Í b V!8 û,X2Ï4³ [,X1k "© Ã ¹ y « Äà Ê È EÖ h ž â ü4“ ê,X ÈP¬?U" È J> Au1k T Ú å À,X ¥) • å Ä

6 4§AŽ

[¤ Î Z Ô/¡ Ã ü4“ h*ü,X+ o2Ï4³M- Õ0 n r { •"© ÄE- Ô1k"© Î bE²4Á4“ û?˜ æ T È Ú r { KÂNl Ú?· 0 n + &• ž J { &I # z ,XAu1kKÂNl ` Î b&I # z,X4“ û?˜ æ { KÂNl Ä ü ! Ô þ $KÂNl È E¤*ü Î bE²4Á%B# ,XKÈ y •"© Aš ÿ `Au1k!£ þ EL= Lp,X0 n + &• È aAu1k Ø /¡ { Í b0 n>© z,X&I # z ×ü â Ô þ $KÂNl È B&I # z µ C È XEô Ô þ4“ û?˜ æ { KÂNl 9Au 1k { ?· Ä1k"© G›*ü Z Ô o ¤P¬4“ û?˜ æ { Ý û,X1*+9 ÄEîE› Í Ñ ê Ô þ 30008V&•,X rL 2Ï4³ ,X h*ü>< â È [¤1k"© Ý r*ü,X Ä

–5× [)

[1] %, [Lò ÈL G È"\/*A¦ Ê+ o2Ï4³+ _0 n û-è0J4ÐEÄ[J] Ê+ 5% T È2001 È25(9) Ö51-54 Ê
Pan Wenxia È Chen Yunping È Shen Zuyi Ê A survey of voltage stability studies[J] Ê Power System Technology È 2001 È25(9) Ö51-54 Ê

[2] < p È° › È « Ê+ o2Ï4³+ _M- Õ0 n û Û ÛA˜EÄ[J] Ê+ 5% T È2001 È25(1) Ö1-7 Ê
Zhou Shuangxi È Jiang Yong È Zhu Lingzhi Ê Review on Steady State Voltage Stability Indices of Power System [Ê] Power System Technology È 2001 È25(1) Ö1-7 Ê

[3] " H$d È)_/"8Å Ê Î bM- Õ1 ` Ö Ú?·,X ¿Eó+ _0 n û Ú d •"©[J] Ê Ñ+ ¹/ß : y È2003 È23(4) Ö1-4,20 Ê
Li Xingyuan È Wang Xiuying Ê Fast voltage stability analysis methods based on static equivalence and singular value resolution [J] Ê Proceedings of the CSEE È 2003 È23(4) Ö1-4,20 Ê

[4] ÙT¢ é È‰) ´ È) ÄC2 ÊŠ Õ0NKÈ + _0 n û,X | Õ Ú d[J] Ê Ñ+ ¹/ß : y È2001 È21(5) Ö17-22 Ê
Bao Lixin È Duan Xianzhong È He Yangzan Ê Dynamical analysis of voltage stability in state space [Ê] Proceedings of the CSEE È 2001 È 21(5) Ö17-22 Ê

[5])_$þ È b4» 9 È Ç' Ê/ï,Ì < ü+ _0 n E ,X 0*ü[J] Ê Ñ + ¹/ß : y È1999 È19(12) Ö76-80 Ê
Wang Yi È Yu Jilai È Liu Zhuo Ê The roles of the transversal regulation by phase shifter in voltage stability crisis [Ê] Proceedings of the CSEE È1999 È19(12) Ö76-80 Ê

[6] Canizares C Æ Ê Applications of optimization to voltage collapse analysis[C] Ê EEE/PES Summer Meeting È San Diego È July 14 È 1998 Ö 1-8 Ê

[7] Canizares C Æ È Rosehart W È Berizzi A *et al* Ê Comparison of voltage security constrained optimal power flow techniques [Ê] EEE/PES Summer Meeting È Vancouver, BC, Canada È July È 2001 È 1680-1685 Ê

[8] Zhihong Feng È Ajjarapu V È Maratukulam D Æ Ê A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse [J] Ê IEEE Trans. on Power Systems È 2000 È 15(2) Ö 791-797 Ê

[9] Capitanescu F È Cutsem T È Ê Preventive control of voltage security margins Öa multicontingency sensitivity-based approach [Ê] IEEE

Trans. on Power Systems, 2002, 17(2): 358-364.

[10] Wu Q, Popovic D, Hill D J *et al*. Voltage security enhancement via coordinated control[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(1): 127-135.

[11] ‹ ´ 9 È L : Ê+ 5%M- Õ+ _0 n { D : õ _,X-è0J[J] Ê+ o2Ï4³7¾ | ê È1999 È11 Ö21-24 Ê
Kang Zhongjian, Chen Xueyun. Study on mathematical model of power network static voltage stability control[J]. Power System Automation, 1999, 11: 21-24.

[12] Wang X, Jebe G C, Tong J *et al*. Preventive/corrective control for voltage stability using direct interior point method[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(3): 878-883.

[13] Chiang H D, Flueck A J, Shah K S *et al*. CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634.

[14] Greene S, Dobson I, Alvarado F L. Sensitivity of the Loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(1): 262-272.

[15] Greene S. Margin and sensitivity methods for security analysis of electric power systems[D]. Madison: University of Wisconsin, 1998.

[16] L 7ð Ê+ o2Ï4³M- Õ] < Ú d[M] ÊÞ#K ÖÞ#K xEî û : Î(/ È 1985 Ê

0 ¹ ó Ö2004-09-08 Ä
05Ù1T Ÿ Ö

Cl "• Ä1972- ÅÈ+ È . ¿ È ?U ¢ _+ o2Ï4³ ì êE¤> ÃM- Õ0 n â { `+ o Ö •M6,X-è0J ¹ 0 ×
"3 ' ð Ä1956- ÅÈ+ È - \ È IEEE FELLOW, ?U ¢ _+ o2Ï4³ Ú d È0 n â { ,X-è0J ¹ 0 ×
ô â Ä1948- ÅÈ+ È - \ È . ¿*ó Ð Ü È IEEE P¬4{ î ,, ?U ¢ _+ o2Ï4³E¤> Ã Ú d ` { ,X-è0J ` - : ¹ 0 Ä