

Tensión Homopolar en Inversores Trifásicos Fuente de Tensión con Cuatro Ramas de Interruptores

O. Pinzón-Ardila, P. García-Gonzalez y A. García-Cerrada

Departamento de Electrónica y Automática, Universidad Pontificia Comillas

C/ Alberto Aguilera 23, 28015, Madrid, España

E-mails: Omar.Pinzon@iit.upco.es, Pablo.Garcia@iit.upco.es y Aurelio.Garcia@iit.upco.es

Resumen— El presente trabajo analiza la generación de tensión homopolar en inversores trifásicos fuente de tensión con cuatro ramas de interruptores. Se demuestra que los valores requeridos de tensiones d y q determinan los tiempos de los modos activos que deben calcularse en primer lugar. Después deben determinarse los tiempos de los modos inactivos en función del valor de tensión homopolar requerido y de la conmutación de la cuarta rama. Además, se han estudiado los límites de tensión homopolar que se pueden obtener en régimen permanente una vez fijados los valores de las tensiones dq de salida. Se validan los resultados obtenidos por medio de simulación y un prototipo de laboratorio.

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores electrónicos de c.c. a c.a (inversores) se usan para el control de velocidad y posición de accionamientos eléctricos de c.a. y sistemas de alimentación ininterrumpida entre otras aplicaciones. Por lo general, se conectan a sistemas monofásicos o trifásicos sin hilo neutro [1] donde el valor de la tensión homopolar de salida no tiene interés. Sin embargo, en ocasiones también se usan en aplicaciones con hilo neutro, por ejemplo en la aplicación de Filtros Activos de Potencia para sistemas de distribución [2]. En estos casos la tensión homopolar se debe incluir en los algoritmos de control, lo que justifica un estudio detallado.

Generalmente la tensión de entrada de un inversor es constante y la tensión de salida se controla usando una modulación de ancho de pulso (PWM). La modulación de ancho de pulso en inversores con cuatro ramas de interruptores presentan un elevado coste computacional y difieren sensiblemente de los empleados en inversores con tres ramas de interruptores [3], [4]. En este trabajo se intenta reducir el coste computacional de la modulación de ancho de pulso en inversores con cuatro ramas de interruptores, evolucionando a partir de los algoritmos que se emplean en inversores sin hilo neutro [5]. Como resultado, se logra un algoritmo sencillo de implementar.

Este artículo se ha organizado en cuatro secciones, incluida esta introducción. En la sección II se estudia el inversor con cuatro ramas de interruptores y se presenta la técnica de PWM de vector espacial; se determinan los tiempos de los modos activos e inactivos para obtener las tensiones de referencia y se obtienen las expresiones de tensión homopolar máxima y mínima para cada pareja de tensiones d y q . Además, se han estudiado los límites de tensión homopolar que se puede obtener en régimen permanente una vez fijados los valores de las tensiones dq de salida. En la sección III se validan

los resultados por medio de simulación y un prototipo de laboratorio. Finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones.

II. INVERSORES CON CUATRO RAMAS DE INTERRUPTORES E HILO NEUTRO

La Fig. 1 muestra el esquema simplificado del inversor trifásico con cuatro ramas de interruptores que se va a analizar.

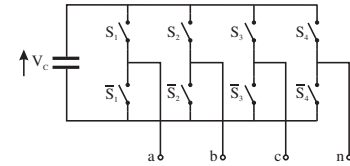


Fig. 1. Inversor trifásico con cuatro ramas e hilo neutro.

II-A. Tensión de salida aplicando la modulación del Vector Espacial

El inversor de cuatro ramas tiene las mismas limitaciones de operación en cuanto a la situación de los interruptores que un inversor con tres ramas y sin hilo neutro [6]. En este caso existen 16 modos y cada estado se identifica con la situación de un interruptor de cada rama. En la Tabla I se recogen los modos del inversor con cuatro ramas. En la columna S_{1234} se indica la situación de los interruptores superiores de cada rama (de izquierda a derecha, 1 encendido 0 apagado).

La Tabla I también recoge las tensiones de las fases a, b y c con respecto a n (V_{an} , V_{bn} y V_{cn}) y las tensiones en ejes $0dq$ aplicando la transformación de Park:

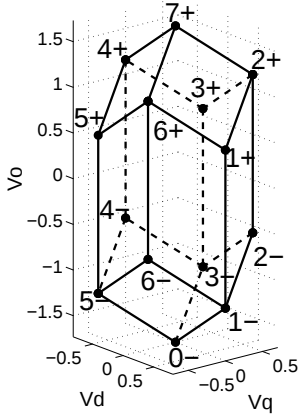
$$\mathbf{V}_{0dq} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

En la topología del inversor de cuatro ramas los modos denominados 0^+ , 0^- , 7^+ y 7^- producen tensión cero en ejes d y q , por tanto son modos inactivos, mientras que los modos del 1^+ al 6^+ y 1^- al 6^- son modos activos. Básicamente, la cuarta rama divide la Tabla I en dos partes: los modos 0^+ al 7^+ suministran componente homopolar positiva y los modos 0^- al 7^- , componente homopolar negativa.

TABLA I

TENSIONES DE FASE Y $0dq$ DEL INVERSOR CON CUATRO RAMAS.

Modo	S_{1234}	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_0	V_d	V_q
0^+	0000	0	0	0	0	0	0
1^+	1000	V_c	0	0	$\frac{V_c}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0
2^+	1100	V_c	V_c	0	$\frac{2V_c}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_c}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_c}{\sqrt{2}}$
3^+	0100	0	V_c	0	$\frac{V_c}{\sqrt{3}}$	$-\frac{V_c}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_c}{\sqrt{2}}$
4^+	0110	0	V_c	V_c	$\frac{2V_c}{\sqrt{3}}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0
5^+	0010	0	0	V_c	$\frac{V_c}{\sqrt{3}}$	$-\frac{V_c}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_c}{\sqrt{2}}$
6^+	1010	V_c	0	V_c	$\frac{2V_c}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_c}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_c}{\sqrt{2}}$
7^+	1110	V_c	V_c	V_c	$\sqrt{3}V_c$	0	0
0^-	0001	$-V_c$	$-V_c$	$-V_c$	$-\sqrt{3}V_c$	0	0
1^-	1001	0	$-V_c$	$-V_c$	$-\frac{2V_c}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0
2^-	1101	0	0	$-V_c$	$-\frac{V_c}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_c}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_c}{\sqrt{2}}$
3^-	0101	$-V_c$	0	$-V_c$	$-\frac{2V_c}{\sqrt{3}}$	$-\frac{V_c}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_c}{\sqrt{2}}$
4^-	0111	$-V_c$	0	0	$-\frac{V_c}{\sqrt{3}}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0
5^-	0011	$-V_c$	$-V_c$	0	$-\frac{2V_c}{\sqrt{3}}$	$-\frac{V_c}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_c}{\sqrt{2}}$
6^-	1011	0	$-V_c$	0	$-\frac{V_c}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_c}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_c}{\sqrt{2}}$
7^-	1111	0	0	0	0	0	0

Fig. 2. Representación espacial de los Modos del inversor trifásico con cuatro ramas en ejes $0dq$. Las líneas discontinuas indican modos localizados detrás del punto de vista dado.

La Fig. 2 ilustra los modos del inversor con cuatro ramas en tres dimensiones donde sus ejes son directo, cuadratura y homopolar. La superficie envuelve las tensiones que puede generar durante un periodo de conmutación. La proyección sobre el plano dq produce la Fig. 3. Los modos con superíndice (+) tienen la misma tensión en ejes d y q que sus homónimos con superíndice (-). Los primeros proporcionan tensión homopolar positiva y los segundos proporcionan tensión homopolar negativa. Esta figura, a su vez, se puede dividir en sectores conforme se agrupan en la Tabla II.

El inversor de cuatro ramas conmuta entre varios modos adyacentes durante un periodo de muestreo [6], de forma tal, que el valor medio de las tensiones aplicadas en ejes d , q y 0 coincidan con los valores deseados.

Si se definen a^+ , a^- , b^+ y b^- como los modos activos que limitan un sector dado por la Tabla II y en el que se encuentra

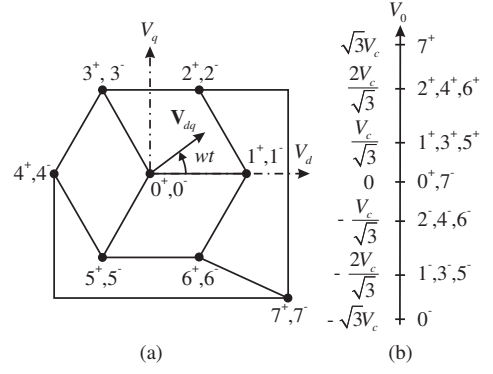
Fig. 3. (a) Modos proyectados en el plano dq de un inversor con cuatro ramas. Las líneas continuas indican los modos activos adyacentes. Los superíndices de los modos + y - diferencia a modos que se proyectan sobre el mismo punto en el plano dq . (b) Componente homopolar suministrada por cada modo.

TABLA II

SECTORES CON MODOS ADYACENTES

Sector	modo a	modo b	$\angle ab$
I	1	2	$0^\circ \leq \omega t < 60^\circ$
II	3	2	$120^\circ > \omega t \geq 60^\circ$
III	3	4	$120^\circ \leq \omega t < 180^\circ$
IV	5	4	$240^\circ > \omega t \geq 180^\circ$
V	5	6	$240^\circ \leq \omega t < 300^\circ$
VI	1	6	$360^\circ > \omega t \geq 300^\circ$

la tensión de referencia para el inversor, V_{0dq} , se tiene:

$$V_{0dq} = t_a^+ V_{0dq}^{a+} + t_b^+ V_{0dq}^{b+} + t_0^+ V_{0dq}^{0+} + t_7^+ V_{0dq}^{7+} + t_a^- V_{0dq}^{a-} + t_b^- V_{0dq}^{b-} + t_0^- V_{0dq}^{0-} + t_7^- V_{0dq}^{7-} \quad (2)$$

$$1 = t_a^+ + t_a^- + t_b^+ + t_b^- + t_0^+ + t_0^- + t_7^+ + t_7^- \quad (3)$$

Los tiempos en cada modo están en p.u. y el tiempo base es el periodo de conmutación.

II-B. Tiempos en modos activos

Sin pérdida de generalidad, se estudia como obtener una tensión de salida para el primer sector (modos 1-2) y más adelante se generaliza para los siguientes sectores.

Al sustituir los valores correspondientes de la Tabla I en (2), en p.u. con respecto a la tensión del condensador, y resolviendo para t_a y t_b :

$$\begin{bmatrix} t_a \\ t_b \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

Nótese que t_a es el tiempo total de los modos a ($t_a^+ + t_a^-$) y t_b es el tiempo total de los modos b ($t_b^+ + t_b^-$).

II-C. Tensión homopolar máxima y mínima en régimen permanente

La tensión homopolar se calcula sumando las aportaciones de tensión homopolar que suministra cada modo involucrado en (2):

$$V_0 = \frac{V_c}{2\sqrt{3}}(t_b - t_a) + \frac{\sqrt{3}V_c}{2}(t_7 - t_0) + \frac{\sqrt{3}V_c}{2}(t^+ - t^-) \quad (5)$$

En régimen permanente las tensiones en ejes d y q son:

$$v_d = v_{dq} \cos(\omega t) \quad y \quad v_q = v_{dq} \sin(\omega t) \quad \angle a \leq \omega t < \angle b \quad (6)$$

donde v_{dq} es el módulo del vector de tensión dq en p.u., empleando como base la tensión del condensador de entrada.

Asumiendo que un cambio en la cuarta rama se produce en t_a : $t^+ = t_0 + t_a^+$ y $t^- = t_a^- + t_b + t_7$ y sustituyendo las tensiones d y q en régimen permanente (6) en (4) se obtienen los tiempos activos en régimen permanente para el primer sector. Generalizando en todos los sectores se tiene t_a y t_b como:

$$\begin{aligned} t_a &= (-1)^s \sqrt{2} v_{dq} \sin(\omega t - \angle b) & \angle a \leq \omega t < \angle b \\ t_b &= (-1)^{(s+1)} \sqrt{2} v_{dq} \sin(\omega t - \angle a) & \angle a \leq \omega t < \angle b \end{aligned} \quad (7)$$

donde s es el número del sector (Tabla II) en el que se encuentra el vector de la tensión de referencia.

La máxima tensión homopolar (v_{0max}) que produce un inversor con cuatro ramas de interruptores se obtiene si se dedica el tiempo sobrante al modo 7 (el tiempo en 0 se hace cero) y el tiempo de la cuarta rama t^+ se hace igual al periodo de muestreo. Usando (7) y (3) queda:

$$v_{0max} = \sqrt{3} - \sqrt{2} v_{dq} \cos(\omega t - \angle a) \quad \angle a \leq \omega t < \angle b \quad (8)$$

Además, $\omega t = \angle a$ hace mínima la tensión homopolar máxima y corresponde al valor límite superior de la máxima tensión homopolar en régimen permanente que puede suministrar un inversor trifásico con cuatro ramas. Es decir.

$$v_{0limite}^+ = \sqrt{3} - \sqrt{2} v_{dq} \quad (9)$$

El límite mínimo de la tensión homopolar en régimen permanente (v_{0min}) se obtiene con $t_7 = 0$ y $t^- = 1$.

$$v_{0min} = -\sqrt{3} + \sqrt{2} v_{dq} \cos(\omega t - \angle b) \quad \angle a \leq \omega t < \angle b \quad (10)$$

Si $\omega t = \angle b$ se obtiene el límite inferior de mínima tensión homopolar en régimen permanente que puede suministrar un inversor trifásico con cuatro ramas:

$$v_{0limite}^- = -\sqrt{3} + \sqrt{2} v_{dq} \quad (11)$$

La Fig. 4(a) muestra las curvas de componente homopolar máximo y mínimo cuando se hace girar un vector de tensión v_{dq} de magnitud 0,5 p.u. El sector dibujado cubre dos modos adyacentes ($a = 1$ y $b = 2$). Las líneas discontinuas muestran los límites máximo y mínimo de tensión homopolar para régimen permanente.

La Fig. 4(b) muestra los límites máximo y mínimo de tensión homopolar en régimen permanente en función del

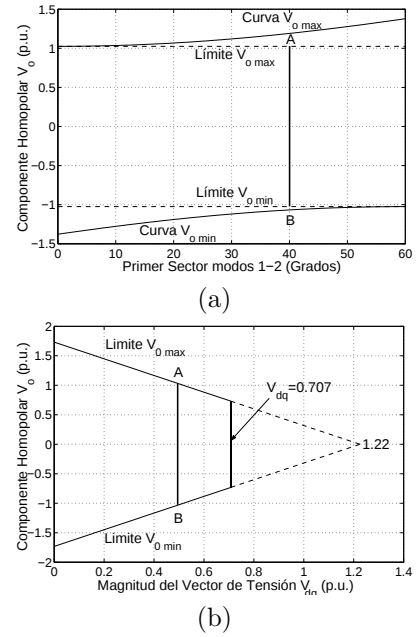


Fig. 4. (a). Máxima y mínima tensión homopolar en función la posición de un vector giratorio dq de magnitud 0,5 p.u. (b) Límites de la componente homopolar en función del módulo de un vector giratorio dq en régimen permanente (Tensión del condensador $v_c = 1$ p.u.).

módulo de la tensión dq . El trazo continuo muestra el área que determina los valores posibles de tensión homopolar que puede entregar de forma permanente. En las figuras se dibujan las líneas AB , las cuales muestran la relación entre las curvas de tensión homopolar máxima y mínima, y sus límites para un modulo de tensión dq de 0,5 p.u. El valor característico 0,707 se corresponde con la máxima tensión dq de salida que se puede obtener del inversor de forma permanente.

II-D. Relación de los límites de tensión homopolar entre inversores de tres y cuatro ramas de interruptores

Para un inversor con tres ramas de interruptores e hilo neutro conectado al punto medio de la rama de condensadores, se puede calcular su límite de forma similar al procedimiento utilizado en inversores de cuatro ramas de interruptores, como:

$$v_{0limite}^\pm = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} v_c \mp \sqrt{2} v_{dq} \quad (12)$$

En la Fig. 5 se comparan los límites de tensión homopolar para inversores de tres y cuatro ramas de interruptores. Se observa que el inversor de cuatro ramas puede entregar mayor tensión homopolar que el inversor de tres ramas, asumiendo las mismas condiciones en la rama de condensadores (1 p.u.).

III. RESULTADOS

Los resultados se han validado mediante simulación, utilizando Simulink de Mathworks, y un prototipo de laboratorio. El prototipo consta de dos inversores trifásicos Skiip 102 GDL 120 303 WT de Semikron que operan con una tensión total del condensador de 200V y sin carga en terminales de salida. Los inversores, a su vez, se controlan por medio de una FPGA en la

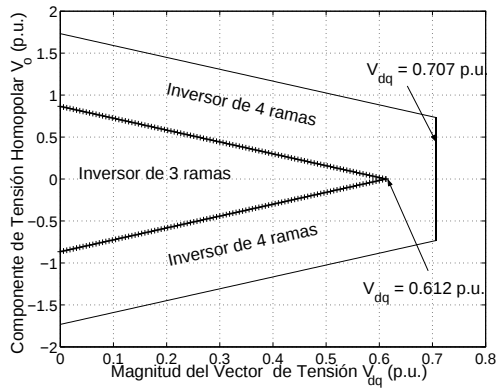


Fig. 5. Límites de tensión homopolar en inversores de tres y cuatro ramas.

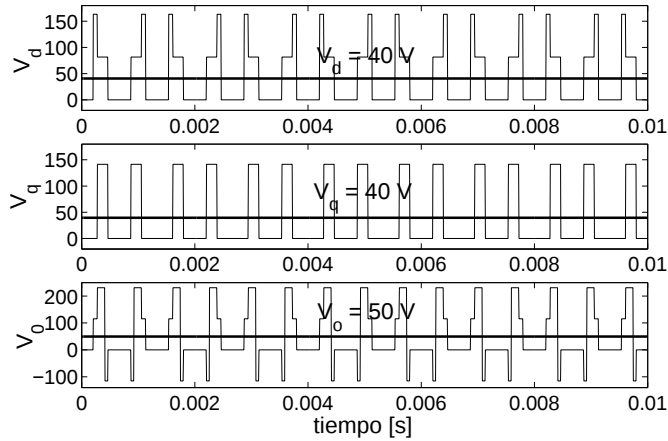


Fig. 6. Resultados de simulación para un inversor con cuatro ramas de interruptores. Valores promedio de las tensiones ($V_d = 40V$, $V_q = 40V$ y $V_o = 50V$). Tensión en el condensador 200V. Frecuencia de conmutación 1,5kHz.

que se implementan los tiempos de conmutación de cada una de las ramas. La frecuencia de conmutación de los inversores es 1,5 kHz.

En la Fig. 6 y Fig. 7 se muestran los resultados de simulación y experimentales y de un inversor con cuatro ramas de interruptores. La tensión de referencia de $V_d = 40V$, $V_q = 40V$ y $V_o = 50V$, y con una tensión total en el condensador de 200 V. Los resultados muestran la tensión de salida de un inversor con cuatro ramas después de realizar la transformada de Park a las tensiones de fase en terminales de salida del inversor.

IV. CONCLUSIONES

Los inversores con hilo neutro se estudian con el propósito de controlar la tensión homopolar que puede entregar en terminales de salida. El control de tensión homopolar es un requisito en los dispositivos de conversión de energía a cuatro hilos.

En este estudio se obtiene que los tiempos activos no dependen de la tensión homopolar entregada por el inversor, por tal razón es posible ver el inversor con hilo neutro como una extensión del inversor sin hilo neutro.

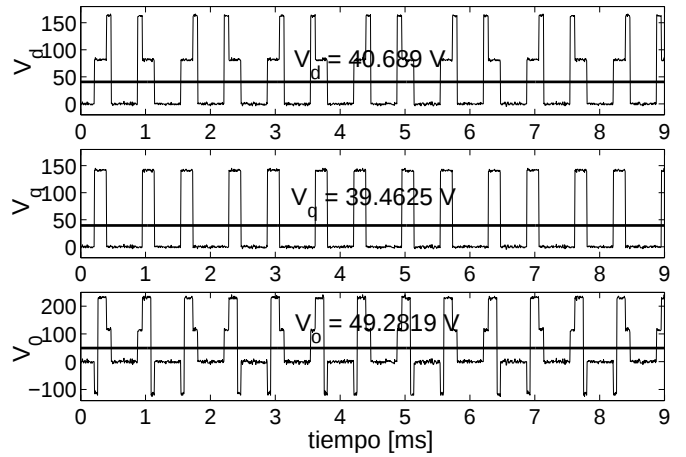


Fig. 7. Resultados experimental de la modulación de ancho de pulso en un inversor con cuatro ramas de interruptores. Valores promedio de las tensiones ($V_d = 40V$, $V_q = 40V$ y $V_o = 50V$). Tensión en el condensador 200V. Frecuencia de conmutación 1,5kHz.

También, se destacan las expresiones de máximo y mínimo valor de tensión homopolar al igual que las expresiones de los límites de tensión homopolar en régimen permanente. Estos límites facilitan la implementación de los algoritmos de control y encierran el área donde el inversor puede suministrar tensión homopolar en régimen permanente.

Se observa que el inversor de cuatro ramas puede entregar más tensión homopolar en régimen permanente que el inversor de tres ramas. Ambos se controlan de forma muy similar.

El prototipo empleado para validar los algoritmos sigue fielmente los valores obtenidos en teoría. Pequeñas desviaciones de la medida se debe a la exactitud de los temporizadores de la FPGA y la frecuencia de operación de los mismos.

REFERENCIAS

- [1] M. H. Rashid, *Electrónica de Potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*, segunda ed. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1995.
- [2] H. Akagi, "Control strategy and site selection of shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp. 354–363, Jan. 1997.
- [3] R. Zhang, V. H. Prasad, and F. C. L. Dushan Boroyevich, "Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 3, pp. 314–326, 2002.
- [4] D. Shen and P. W. Lehn, "Fixed-frequency space-vector modulation control for three-phase four-leg active power filters," *IEEE Proceeding Electronic Power Application*, vol. 149, no. 4, pp. 268–274, 2002.
- [5] O. Pinzón-Ardila, A. García-Cerrada, and P. García-González, "Tensión homopolar en inversores trifásicos fuente de tensión con tres ramas de interruptores," in *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'04)*, vol. 1, Centre des Congrès Pierre Baudis de Toulouse, Francia., 2004.
- [6] J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion," *Proceeding of the IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1194–1214, Aug. 1994.