



© AP/Wide World Photos

Όταν ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο σταματάει στα pits, οι μηχανικοί δίνουν μάχη με τον χρόνο προκειμένου να κάνουν στο αυτοκίνητο τις απαιτούμενες ρυθμίσεις και να το ανεφοδιάσουν με καύσιμα.

Τα μέλη της ομάδας αισθάνονται υπερήφανα για την ταχύτητά τους, καθώς ακόμη κι ένα κλάσμα του δευτερολέπτου που χάνεται στα pits είναι ικανό να κοστίσει στον οδηγό τη νίκη. Ωστόσο, ο γρήγορος ανεφοδιασμός καυσίμων μοιάζει να είναι επικίνδυνος αφού το αυτοκίνητο ενδέχεται να είναι φορτισμένο σ' ένα δυναμικό των -30 kV τη στιγμή που φτάνει στα pits. Αν προκληθεί σπινθήρας στη μηχανή του αυτοκινήτου λόγω των αναθυμιάσεων του καυσίμου, μπορεί να ξεσπάσει πυρκαγιά.

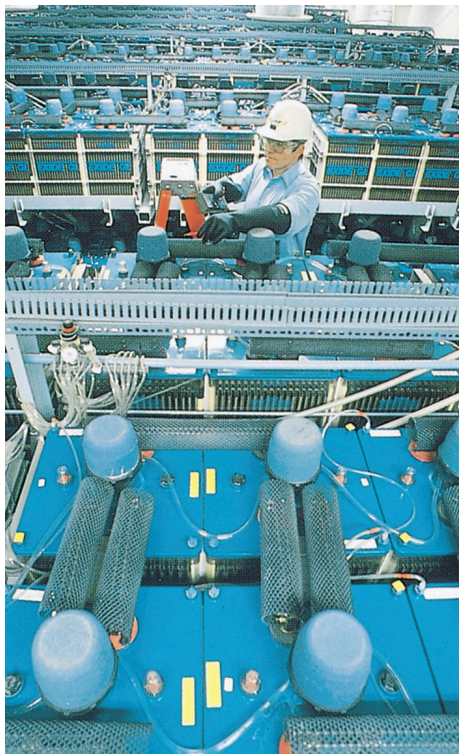
**Ποιες
προφυλάξεις
πρέπει
να ληφθούν ώστε
να αποτραπεί
μια ενδεχόμενη
πυρκαγιά;**

Η απάντηση βρίσκεται σ' αυτό το κεφάλαιο.

12-1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ Η ΦΥΣΙΚΗ;

Περιβαλλόμαστε από ηλεκτρικά κυκλώματα και είναι πολύ πιθανό να είμαστε περήφανοι για το πόσες ηλεκτρικές συσκευές διαθέτουμε ή να έχουμε μια νοερή λίστα με τις συσκευές που θα θέλαμε μια μέρα να αποκτήσουμε. Καθεμιά από τις συσκευές αυτές, όπως και το ηλεκτρικό δίκτυο που τροφοδοτεί το σπίτι μας με ρεύμα, εξαρτάται από τη σύγχρονη επιστήμη της μηχανικής του ηλεκτρισμού. Αν και δεν είναι εύκολο να εκτιμήσουμε την τρέχουσα οικονομική αξία της μηχανικής του ηλεκτρισμού και των προϊόντων της, μπορούμε να είμαστε βέβαιοι πως η αξία αυτή συνεχίζει να αυξάνεται χρόνο με τον χρόνο, καθώς όλο και περισσότερες εργασίες διεξάγονται με ηλεκτρικά μέσα. Τα ραδιόφωνα σήμερα συντονίζονται ηλεκτρονικά και όχι χειροκίνητα. Η ανταλλαγή μηνυμάτων γίνεται πλέον μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας (e-mail) και όχι ταχυδρομικά. Τα επιστημονικά περιοδικά διαβάζονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και όχι σε κάποιο κτίριο βιβλιοθήκης και οι επιστημονικές εργασίες αντιγράφονται και αρχειοθετούνται ηλεκτρονικά αντί να φωτοτυπούνται και να φυλάσσονται σε κάποια αρχειοθήκη.

Η βασική επιστήμη πίσω από την επιστήμη του ηλεκτρολόγου μηχανικού είναι η φυσική. Σ' αυτό το κεφάλαιο καλύπτουμε τη φυσική των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, τα οποία αποτελούν συνδυασμούς αντιστάτων και μπαταριών (και πυκνωτών στην Παράγραφο 27-9). Θα περιορίσουμε τη συζήτησή μας σε κυκλώματα μέσω των οποίων το φορτίο ρέει προς μία κατεύθυνση. Αυτά τα κυκλώματα ονομάζονται *κυκλώματα συνεχούς ρεύματος* ή *κυκλώματα DC*. Ξεκινάμε με το ερώτημα: πώς μπορούμε να κάνουμε τα φορτία να ρέουν;



Στο μεγαλύτερο εργοστάσιο αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών παγκοσμίως (που εγκαταλείφθηκε το 1996) είχαν συνδεθεί πάνω από 8000 μεγάλες μπαταρίες μολύβδου σε 8 σειρές των 1000 V η καθεμιά, με δυνατότητα ισχύος 10 MW για 4 ώρες. Αφού φορτιζόνταν όλη τη νύχτα, οι μπαταρίες χρησιμοποιούνταν κατά τις περιόδους μεγάλης ζήτησης ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο. (Ευγενική χορηγία Southern California Edison Company)

27-2 «Αντλώντας» Φορτία

Αν θέλετε να προκαλέσετε τη ροή φορέων ηλεκτρικού φορτίου διαμέσου ενός αντιστάτη, θα πρέπει να εφαρμόσετε μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων της συσκευής. Ένας τρόπος για να το πετύχετε αυτό είναι να συνδέσετε το κάθε άκρο του αντιστάτη με τον έναν οπλισμό ενός φορτισμένου πυκνωτή. Το πρόβλημα μ' αυτή τη συνδεσμολογία, ωστόσο, είναι πως η ροή του ηλεκτρικού φορτίου αποφορτίζει τον πυκνωτή κι έτσι πολύ γρήγορα οι οπλισμοί του πυκνωτή αποκτούν το ίδιο δυναμικό. Όταν συμβεί αυτό, το ηλεκτρικό πεδίο εντός του αντιστάτη παύει να υπάρχει κι έτσι η ροή του ηλεκτρικού φορτίου σταματά.

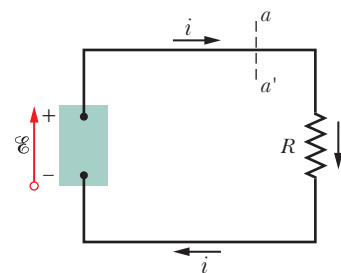
Προκειμένου να δημιουργήσετε μια σταθερή ροή φορτίου, χρειάζεστε μια «αντλία φορτίου», μια συσκευή η οποία, παράγοντας έργο στους φορείς φορτίου, διατηρεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο άκρα. Ονομάζουμε μια τέτοια συσκευή **ηλεκτροεγερτική συσκευή**, και λέμε ότι η συσκευή παρέχει μια **ηλεκτροεγερτική δύναμη (HEΔ - EMF)** $\mathcal{E}$, που σημαίνει ότι παράγει έργο στους φορείς ηλεκτρικού φορτίου. Μια συσκευή HEΔ ονομάζεται *μερικές φορές θέση της HEΔ*. Ο όρος *HEΔ* προέρχεται από την απαρχαιωμένη φράση *ηλεκτροεγερτική δύναμη*, που υιοθετήθηκε προτού οι επιστήμονες κατανοήσουν επακριβώς τη λειτουργία μιας τέτοιας συσκευής.

Στο Κεφάλαιο 26 μελετήσαμε την κίνηση των φορέων φορτίου διαμέσου ενός κυκλώματος με βάση το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται στο κύκλωμα: αυτό το πεδίο δημιουργεί δυνάμεις οι οποίες μετακινούν τους φορείς φορτίου. Στο κεφάλαιο αυτό ακολουθούμε μια διαφορετική προσέγγιση. Μελετάμε την κίνηση των φορέων φορτίου με βάση την

απαιτούμενη ενέργεια: μια ηλεκτρεγερτική συσκευή παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση μέσω του έργου που παράγει.

Μια συνηθισμένη ηλεκτρεγερτική συσκευή είναι η *μπαταρία*, η οποία χρησιμοποιείται για να δώσει ενέργεια σε διάφορες μηχανές, από ρολόγια χειρός έως υποβρύχια. Ωστόσο η ηλεκτρεγερτική συσκευή που επηρεάζει περισσότερο την καθημερινότητά μας είναι η *ηλεκτρική γεννήτρια*, η οποία δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού στα σπίτια και στους χώρους εργασίας μας μέσω συνδέσεων (καλωδίων) με κάποιο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ηλεκτρεγερτικές συσκευές που είναι γνωστές ως *ηλιακοί συλλέκτες*, γνωστές από παλιά σαν οι επίπιδες διατάξεις των διαστημοπλοίων που μοιάζουν με φτερά, χρησιμοποιούνται επίσης στην επαρχία για οικιακές εφαρμογές. Λιγότερο συνηθισμένες ηλεκτρεγερτικές συσκευές είναι οι *κνυέλες καυσίμων* που τροφοδοτούν τα διαστημικά λεωφορεία, καθώς και οι θερμικές στήλες (*thermopiles*) που παρέχουν ηλεκτρικό ρεύμα σε κάποια διαστημόπλοια και σε κάποιους απομακρυσμένους σταθμούς στην Ανταρκτική και αλλού. Η ηλεκτρεγερτική συσκευή δεν είναι απαραίτητα όργανο: έμβια συστήματα, από το ηλεκτρικό χέλι και τους ανθρώπους έως τα φυτά έχουν φυσικές ηλεκτρεγερτικές συσκευές.

Αν και οι συσκευές που αναφέραμε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας τους, όλες εκτελούν την ίδια βασική λειτουργία: παράγουν έργο στους φορείς φορτίου κι έτσι διατηρούν μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών τους.



ΣΧΗΜΑ 27-1 Ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα, στο οποίο μια συσκευή ηλεκτρεγερτικής δύναμης $\mathcal{E}$ παράγει έργο στους φορείς ηλεκτρικού φορτίου και διατηρεί ένα σταθερό ρεύμα i στον αντιστάτη αντίστασης R .

27-3 Έργο, Ενέργεια και ΗΕΔ

Το Σχήμα 27-1 δείχνει μια ηλεκτρεγερτική συσκευή (θεωρήστε πως πρόκειται για μια μπαταρία) η οποία αποτελεί τμήμα ενός απλού κυκλώματος που περιλαμβάνει μία αντίσταση R (το σύμβολο για την αντίσταση και τον αντιστάτη είναι το zigzag). Η ηλεκτρεγερτική συσκευή διατηρεί τον έναν της ακροδέκτη (τον οποίο ονομάζουμε θετικό ακροδέκτη και ο οποίος συχνά συμβολίζεται με $+$) σε υψηλότερο δυναμικό σε σχέση με τον άλλο της ακροδέκτη (τον οποίο ονομάζουμε αρνητικό ακροδέκτη και ο οποίος συχνά συμβολίζεται με $-$). Μπορούμε να αναπαράστούμε την ΗΕΔ της συσκευής με ένα βέλος που ξεκινά από τον αρνητικό ακροδέκτη και έχει κατεύθυνση προς τον θετικό ακροδέκτη, όπως στο Σχ. 27-1. Ένας μικρός κύκλος στην ουρά του βέλους της ΗΕΔ το διαφοροποιεί από τα βέλη που δηλώνουν την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Όταν μια ηλεκτρεγερτική συσκευή δεν συνδέεται σε κάποιο κύκλωμα, η εσωτερική χημεία της συσκευής δεν προκαλεί κάποια συνολική ροή φορέων φορτίου εντός της συσκευής. Ωστόσο, όταν η συσκευή συνδέεται σ' ένα κύκλωμα όπως στο Σχ. 27-1, η εσωτερική της χημεία προκαλεί μια συνολική ροή φορέων θετικού φορτίου από τον αρνητικό ακροδέκτη προς τον θετικό ακροδέκτη, προς την κατεύθυνση δηλαδή του βέλους της ΗΕΔ. Αυτή η ροή αποτελεί μέρος του ηλεκτρικού ρεύματος που δημιουργείται κατά μήκος του κυκλώματος και έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτό (αριστερό-στροφα στο Σχ. 27-1).

Εντός της ηλεκτρεγερτικής συσκευής, φορείς θετικού φορτίου κινούνται από μια περιοχή χαμηλού ηλεκτρικού δυναμικού, και άρα χαμηλής ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας (στον αρνητικό ακροδέκτη), προς μια περιοχή υψηλότερου δυναμικού και υψηλότερης ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας (στον θετικό ακροδέκτη). Αυτή η κίνηση είναι ακριβώς η αντίθετη από εκείνη που θα προκαλούσε στους φορείς του φορτίου το ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στους ακροδέκτες της συσκευής (το οποίο κατευθύνεται από το θετικό ακροδέκτη προς τον αρνητικό).

Επομένως, πρέπει να υπάρχει κάποια πηγή ενέργειας εντός της συσκευής που να της επιτρέπει να παράγει έργο στα φορτία, αναγκάζοντάς τα να κινούνται με αυτόν τον τρόπο. Η πηγή ενέργειας ενδεχομένως να είναι χημική, όπως συμβαίνει σε μια μπαταρία ή σε μια κυψέλη καυσίμου. Μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μηχανικές δυνάμεις, όπως συμβαίνει σε μια ηλεκτρική γεννήτρια. Οι διαφορές στη θερμοκρασία μπορεί να παρέχουν αυτή την ενέργεια, όπως σε μια θερμική στήλη. Ή μπορεί να είναι ο Ήλιος που την παρέχει, όπως σ' έναν ηλιακό συλλέκτη.

Ας αναλύσουμε τώρα το κύκλωμα του Σχ. 27-1 από τη σκοπιά του έργου και των ενεργειακών μετατροπών. Σ' ένα οποιοδήποτε χρονικό διάστημα dt , ένα φορτίο dq διέρχεται από μια διατομή του κυκλώματος, όπως την aa' . Η ίδια ποσότητα φορτίου πρέπει να εισέλθει στην ηλεκτρεγερτική συσκευή από τον ακροδέκτη χαμηλού δυναμικού της και να εξέλθει από τον ακροδέκτη υψηλού δυναμικού. Η συσκευή πρέπει να παράγει μια ποσότητα έργου dW στο φορτίο i ή έτσι ώστε να το αναγκάσει να κινηθεί κατ' αυτό τον τρόπο. Ορίζουμε την ηλεκτρεγερτική δύναμη της συσκευής ως προς αυτό το έργο:

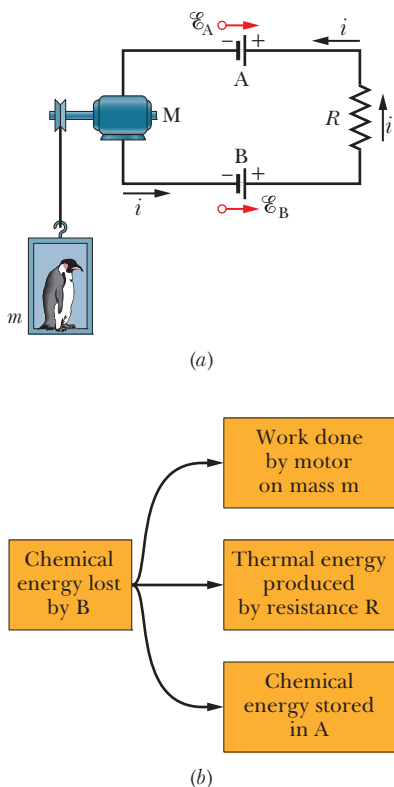
$$\mathcal{E} = \frac{dW}{dq} \quad (\text{ορισμός της } \mathcal{E}). \quad (27-1)$$

Στην ουσία, η ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας ηλεκτρεγερτικής συσκευής είναι το έργο ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου που παράγει η συσκευή προκειμένου να μετακινήσει το φορτίο από τον ακροδέκτη χαμηλού δυναμικού της στον ακροδέκτη υψηλού δυναμικού της. Η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο SI είναι το joule ανά coulomb. Στο Κεφάλαιο 24 ορίσαμε τη μονάδα αυτή ως το volt.

Μια **ιδανική ηλεκτρεγερτική συσκευή** είναι εκείνη που δεν παρουσιάζει καμία εσωτερική αντίσταση στην εσωτερική κίνηση του φορτίου από τον ένα ακροδέκτη στον άλλο. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες μιας ιδανικής ηλεκτρεγερτικής συσκευής είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη της συσκευής. Για παράδειγμα, μια ιδανική μπαταρία με ηλεκτρεγερτική δύναμη 12.0 V έχει πάντα μια διαφορά δυναμικού 12.0 V ανάμεσα στους ακροδέκτες της.

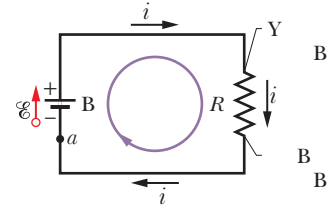
Μια **πραγματική ηλεκτρεγερτική συσκευή**, όπως οποιαδήποτε πραγματική μπαταρία, παρουσιάζει εσωτερική αντίσταση στην εσωτερική κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου. Όταν μια πραγματική ηλεκτρεγερτική συσκευή δεν συνδέεται με κάποιο κύκλωμα, κι έτσι δεν τη διαρρέει ηλεκτρικό ρεύμα, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική της δύναμη. Ωστόσο, όταν μέσα από αυτή τη συσκευή περνά ηλεκτρικό ρεύμα, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της διαφέρει από την ηλεκτρεγερτική της δύναμη. Θα δούμε πιο αναλυτικά τέτοιου είδους πραγματικές μπαταρίες στην Παρ. 27-5.

Όταν μια ηλεκτρεγερτική συσκευή είναι συνδεδεμένη σ' ένα κύκλωμα, η συσκευή μεταφέρει ενέργεια στους φορείς φορτίου που διέρχονται μέσα από αυτή. Η ενέργεια αυτή μπορεί να μεταφερθεί εκ νέου από τους φορείς φορτίου σε άλλες συσκευές του κυκλώματος, για παράδειγμα, για ν' ανάψει μια λάμπα. Το Σχ. 27-2α δείχνει ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει δύο ιδανικές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες A και B, μία αντίσταση R κι έναν ηλεκτροκινητήρα M, ο οποίος μπορεί να ανυψώνει ένα αντικείμενο χρησιμοποιώντας ενέργεια που αποκτά από τους φορείς φορτίου που υπάρχουν μέσα στο κύκλωμα. Παρατηρήστε ότι οι μπαταρίες είναι συνδεδεμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν την τάση να στέλνουν τα φορτία στο κύκλωμα σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η



ΣΧΗΜΑ 27-2 (α) Στο κύκλωμα αυτό $\mathcal{E}_B > \mathcal{E}_A$, επομένως η μπαταρία B καθορίζει την κατεύθυνση του ρεύματος. (β) Οι μετατροπές ενέργειας στο κύκλωμα.

πραγματική κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα καθορίζεται από τη μπαταρία με τη μεγαλύτερη ηλεκτρεγερτική δύναμη, η οποία στην περίπτωσή μας είναι η μπαταρία B, οπότε η χημική ενέργεια της μπαταρίας B μειώνεται καθώς μεταφέρεται ενέργεια στους φορείς φορτίου που τη διατρέχουν. Ωστόσο, η χημική ενέργεια εντός της μπαταρίας A αυξάνεται, επειδή το ηλεκτρικό ρεύμα που τη διαπερνά έχει κατεύθυνση από τον θετικό προς τον αρνητικό ακροδέκτη της. Επομένως, η μπαταρία B φορτίζει τη μπαταρία A. Η μπαταρία B παρέχει επίσης ενέργεια στον κινητήρα καθώς και ενέργεια η οποία δαπανάται από την αντίσταση R . Το Σχ. 27-2β δείχνει και τις τρεις μεταφορές ενέργειας από τη μπαταρία B. Καθεμιά από αυτές έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της χημικής ενέργειας της μπαταρίας.



ΣΧΗΜΑ 27-3 Κύκλωμα ενός βρόχου, στο οποίο μια αντίσταση R συνδέεται στα άκρα μιας ιδανικής μπαταρίας B με ηλεκτρεγερτική δύναμη $\mathcal{E}$. Το παραγόμενο ρεύμα i είναι το ίδιο σε όλο το μήκος του κυκλώματος.

27-4 Υπολογίζοντας το Ρεύμα σε Κύκλωμα Ενός Βρόχου

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε δύο ισοδύναμους τρόπους υπολογισμού του ρεύματος στο απλό κύκλωμα ενός βρόχου του Σχ. 27-3. Η μία μέθοδος βασίζεται σε επιχειρήματα διατήρησης της ενέργειας και η άλλη στην έννοια του δυναμικού. Το κύκλωμα αποτελείται από μια ιδανική μπαταρία με ΗΕΔ $\mathcal{E}$, έναν αντιστάτη με αντίσταση R και δυο διασυνδεδετικά καλώδια. (Εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά, θεωρούμε πως τα καλώδια στα κυκλώματα παρουσιάζουν αμελητέα αντίσταση. Η λειτουργία τους, τότε, είναι να παρέχουν διαδρομές κατά μήκος των οποίων μπορούν να κινούνται οι φορείς φορτίου.)

Ενεργειακή Μέθοδος

Η Εξ. 26-27 ($P = i^2 R$) μας λέει πως σ' ένα χρονικό διάστημα dt ένα ποσό ενέργειας ίσο με $i^2 R dt$ θα παρουσιαστεί στον αντιστάτη του Σχ. 27-3 σαν θερμική ενέργεια. Όπως επισημάνθηκε στην Παρ. 26-7, αυτή η ενέργεια λέμε πως *δαπανάται*. (Επειδή θεωρούμε πως τα καλώδια έχουν αμελητέα αντίσταση, δεν θα παρουσιαστεί κάποια θερμική ενέργεια σε αυτά.) Στο ίδιο χρονικό διάστημα, ένα φορτίο $dq = i dt$ θα έχει μετακινηθεί διαμέσου της μπαταρίας B και το έργο που θα έχει παραγάγει η μπαταρία σ' αυτό το φορτίο, σύμφωνα με την Εξ. 27-1, είναι

$$dW = \mathcal{E} dq = \mathcal{E} i dt.$$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, το έργο που παράγεται από την (ιδανική) μπαταρία θα πρέπει να ισούται με τη θερμική ενέργεια που παρουσιάζεται στον αντιστάτη:

$$\mathcal{E} i dt = i^2 R dt.$$

Η σχέση αυτή μας δίνει

$$\mathcal{E} = iR.$$

Η ΗΕΔ $\mathcal{E}$ είναι η ενέργεια ανά μονάδα φορτίου που μεταφέρεται στα κινούμενα φορτία από την μπαταρία. Η ποσότητα iR είναι η ενέργεια ανά μονάδα φορτίου που μεταφέρεται από τα κινούμενα φορτία και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια εντός του αντιστάτη. Επομένως, η εξίσωση αυτή σημαίνει πως η ενέργεια ανά μονάδα φορτίου που μεταφέρεται στα κινούμενα φορτία ισούται με την ενέργεια ανά μονάδα φορτίου που μεταφέρεται από αυτά. Λύνοντας την εξίσωση ως προς i , βρίσκουμε

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R}. \quad (27-2)$$

Μέθοδος Δυναμικού

Ας υποθέσουμε πως ξεκινάμε από ένα οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος του Σχ. 27-3 και προχωράμε νοερά κατά μήκος του κυκλώματος προς οποιαδήποτε από τις δύο κατευθύνσεις, προσθέτοντας αλγεβρικά τις διαφορές δυναμικού που συναντάμε. Με τον τρόπο αυτό, όταν επιστρέψουμε στην αρχική μας θέση θα πρέπει να έχουμε επιστρέψει στο αρχικό μας δυναμικό. Προτού ωστόσο προχωρήσουμε, θα γενικεύσουμε αυτή την ιδέα δίνοντας έναν κανόνα που ισχύει όχι μόνο για κυκλώματα ενός βρόχου, όπως αυτόν του Σχ. 27-3, αλλά επίσης και για οποιοδήποτε κλειστό βρόχο ενός κυκλώματος *πολλαπλών βρόχων*, όπως θα δούμε στην Παρ. 27-7:



ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΩΝ ΒΡΟΧΩΝ: Το αλγεβρικό άθροισμα των μεταβολών του δυναμικού που συναντώνται σε μια πλήρη διαδρομή οποιουδήποτε βρόχου ενός κυκλώματος, πρέπει να είναι ίσο με μηδέν.

Αυτός ο κανόνας αναφέρεται επίσης ως *κανόνας βρόχων του Kirchhoff* (ή *νόμος τάσεων του Kirchhoff*), προς τιμήν του Γερμανού φυσικού Gustav Robert Kirchhoff. Ο κανόνας αυτός είναι σαν λέμε πως κάθε σημείο πάνω σ' ένα βουνό έχει ένα μοναδικό υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας. Αν ξεκινήσουμε από ένα οποιοδήποτε σημείο κι επιστρέψουμε σε αυτό, αφού προηγουμένως έχουμε περιπλανηθεί στο βουνό, το αλγεβρικό άθροισμα των μεταβολών στο υψόμετρο πρέπει να ισούται με μηδέν.

Στο Σχ. 27-3, θα ξεκινήσουμε από το σημείο a , το δυναμικό του οποίου είναι V_a , και θα κινηθούμε νοερά αριστερόστροφα κατά μήκος του κυκλώματος έως ότου επιστρέψουμε στο a , καταγράφοντας τις διαφορές δυναμικού καθώς προχωράμε. Το σημείο εκκίνησης βρίσκεται στον ακροδέκτη χαμηλού δυναμικού της μπαταρίας. Επειδή η μπαταρία είναι ιδανική, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της είναι ίση με $\mathcal{E}$. Όταν περάσουμε διαμέσου της μπαταρίας στον ακροδέκτη υψηλού δυναμικού, η διαφορά στο δυναμικό θα είναι $+\mathcal{E}$.

Καθώς μετακινούμαστε κατά μήκος του πάνω καλωδίου μέχρι το πάνω άκρο του αντιστάτη, δεν συναντάμε διαφορά στο δυναμικό επειδή το καλώδιο έχει αμελητέα αντίσταση. Το καλώδιο έχει το ίδιο δυναμικό με τον ακροδέκτη υψηλού δυναμικού της μπαταρίας. Το ίδιο δυναμικό έχει και το πάνω άκρο του αντιστάτη. Καθώς περνάμε διαμέσου του αντιστάτη, ωστόσο, το δυναμικό μεταβάλλεται σύμφωνα με την Εξ. 26-8 (την οποία μπορούμε να ξαναγράψουμε σαν $V = iR$). Επιπλέον, το δυναμικό μειώνεται επειδή απομακρυνόμαστε από τον ακροδέκτη υψηλότερου δυναμικού του αντιστάτη. Επομένως, η διαφορά δυναμικού είναι $-iR$.

Επιστρέφουμε στο σημείο a κινούμενοι κατά μήκος του κάτω καλωδίου. Επειδή και αυτό το καλώδιο παρουσιάζει αμελητέα αντίσταση, δεν βρίσκουμε κάποια μεταβολή στο δυναμικό. Πίσω στο σημείο a , το δυναμικό είναι και πάλι V_a . Επειδή διατρέξαμε ένα κλειστό βρόχο, το αρχικό μας δυναμικό, αφού μεταβλήθηκε από τις διαφορές δυναμικού που συναντήσαμε κατά μήκος της διαδρομής, θα πρέπει να είναι ίσο με το τελικό δυναμικό, δηλαδή,

$$V_a + \mathcal{E} - iR = V_a.$$

Ο όρος V_a απαλείφεται σ' αυτή την εξίσωση, η οποία γίνεται

$$\mathcal{E} - iR = 0.$$

Λύνοντας αυτή την εξίσωση ως προς i λαμβάνουμε το ίδιο αποτέλεσμα, $i = \mathcal{E}/R$, όπως και με την ενεργειακή μέθοδο (Εξ. 27-2).

Αν εφαρμόσουμε τον κανόνα των βρόχων σ' έναν κλειστό βρόχο κινούμενοι *δεξιόστροφα*, ο κανόνας μας δίνει

$$-\mathcal{E} + iR = 0$$

και έτσι βρίσκουμε και πάλι πως $i = \mathcal{E}/R$. Επομένως, μπορούμε να διατρέξουμε νοερά ένα βρόχο προς οποιαδήποτε κατεύθυνση προκειμένου να εφαρμόσουμε τον κανόνα των βρόχων.

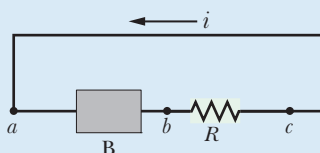
Για να προετοιμαστούμε για κυκλώματα πιο σύνθετα από αυτό του Σχ. 27-3, ας θέσουμε δύο κανόνες για τον υπολογισμό των διαφορών δυναμικού κατά μήκος ενός βρόχου:

ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ: Για μια μετακίνηση διαμέσου μιας αντίστασης κατά την κατεύθυνση του ρεύματος, η μεταβολή στο δυναμικό είναι $-iR$. Κατά την αντίθετη κατεύθυνση η μεταβολή στο δυναμικό είναι $+iR$.

ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΩΝ ΗΕΔ: Για μια μετακίνηση διαμέσου μιας ιδανικής ηλεκτρεγερτικής συσκευής κατά τη κατεύθυνση του βέλους της ΗΕΔ, η μεταβολή στο δυναμικό είναι $+\mathcal{E}$. Κατά την αντίθετη κατεύθυνση η μεταβολή στο δυναμικό είναι $-\mathcal{E}$.



ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ 1 Το σχήμα δείχνει το ρεύμα i σ' ένα κύκλωμα ενός βρόχου με μία μπαταρία B και μια αντίσταση R (καθώς και καλώδια αμελητέας αντίστασης). (α) Το βέλος της ΗΕΔ της μπαταρίας B θα πρέπει να σχεδιαστεί με κατεύθυνση προς τ' αριστερά ή προς τα δεξιά; Στα σημεία a , b και c , κατατάξτε σε φθίνουσα σειρά (β) την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, (γ) το ηλεκτρικό δυναμικό και (δ) την ηλεκτρική δυναμική ενέργεια των φορέων φορτίου.



27-5 Άλλα Κυκλώματα Ενός Βρόχου

Σ' αυτή την ενότητα επεκτείνουμε το απλό κύκλωμα του Σχ. 27-3 με δύο τρόπους.

Εσωτερική Αντίσταση

Το Σχ. 27-4α δείχνει μια πραγματική μπαταρία, με εσωτερική αντίσταση r , συνδεδεμένη με έναν εξωτερικό αντιστάτη, αντίστασης R . Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αποτελεί την ηλεκτρική αντίσταση των αγωγικών μερών της μπαταρίας κι επομένως αποτελεί ένα αναφαίρετο χαρακτηριστικό της. Στο Σχ. 27-4α, ωστόσο, η μπαταρία έχει σχεδιαστεί ξεχωριστά, σαν μια ιδανική μπαταρία με ηλεκτρεγερτική δύναμη $\mathcal{E}$ και μία αντίσταση r . Η σειρά με την οποία σχεδιάζονται τα σύμβολα αυτών των ξεχωριστών τμημάτων δεν έχει κάποια σημασία.

Αν εφαρμόσουμε τον κανόνα των βρόχων αριστερόστροφα, ξεκινώντας από το σημείο a , οι μεταβολές στο δυναμικό μας δίνουν

$$\mathcal{E} - ir - iR = 0. \quad (27-3)$$

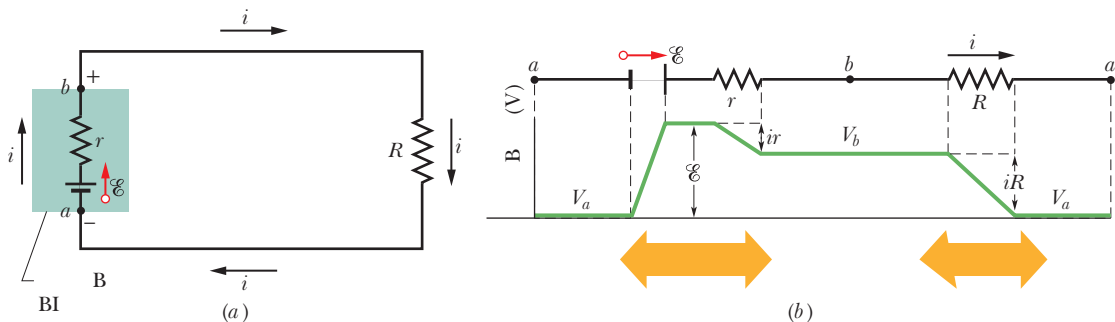
Λύνοντας ως προς το ρεύμα, βρίσκουμε

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (27-4)$$

Παρατηρήστε πως αυτή η εξίσωση ανάγεται στην Εξ. 27-2 στην περίπτωση όπου η μπαταρία είναι ιδανική, δηλαδή όταν $r = 0$.

ΣΧΗΜΑ 27-4

(α) Κύκλωμα ενός βρόχου που περιλαμβάνει μια πραγματική μπαταρία με εσωτερική αντίσταση r και ηλεκτρεγερτική δύναμη $\mathcal{E}$. (β) Το ίδιο κύκλωμα, τώρα απλωμένο κατά μήκος μιας ευθείας. Παρουσιάζονται επίσης τα δυναμικά που συναντώνται καθώς διατρέχουμε το κύκλωμα αριστερόστροφα, ξεκινώντας από το σημείο a . Το δυναμικό V_a τίθεται αυθαίρετα στη τιμή μηδέν και τα υπόλοιπα δυναμικά σχεδιάζονται ως προς το V_a .

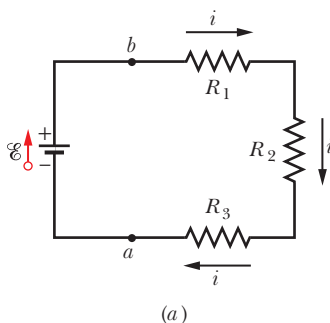


Το Σχ. 27-4β δείχνει γραφικά τις μεταβολές στο ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος του κυκλώματος. (Προκειμένου να συνδέσετε καλύτερα το Σχ. 27-4β με το κλειστό κύκλωμα του Σχ. 27-4α, φανταστείτε πως τυλίγετε το γράφημα σε έναν κύλινδρο όπου το σημείο a στα αριστερά θα ταυτίζεται με το σημείο a στα δεξιά.) Παρατηρήστε πως διατρέχοντας το κύκλωμα είναι σαν να περιπλανιέστε σ' ένα βουνό (δυναμικού), επιστρέφοντας στο σημείο εκκίνησης, δηλαδή επιστρέφοντας στο αρχικό σας υψόμετρο.

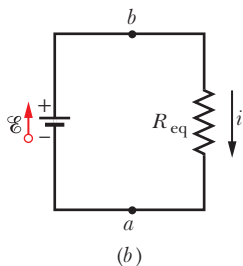
Σ' αυτό το βιβλίο, κάθε φορά που μια μπαταρία δεν περιγράφεται σαν πραγματική ή δεν υποδεικνύεται κάποια εσωτερική αντίσταση, μπορείτε γενικά να θεωρήσετε πως είναι πράγματι ιδανική. Ωστόσο, φυσικά, στην πραγματικότητα υπάρχουν μόνο πραγματικές μπαταρίες οι οποίες παρουσιάζουν εσωτερική αντίσταση.

Αντιστάσεις σε Σειρά

Το Σχ. 27-5α δείχνει τρεις αντιστάσεις, συνδεδεμένες **σε σειρά** με μια ιδανική μπαταρία με ΗΕΔ $\mathcal{E}$. Η περιγραφή αυτή δεν έχει τόσο να κάνει με τον τρόπο σχεδίασης των αντιστάσεων. Αντιθέτως, «σε σειρά» σημαίνει πως οι αντιστάσεις συνδέονται η μία μετά την άλλη και πως μια διαφορά δυναμικού V εφαρμόζεται στα δύο άκρα της συνδεσμολογίας. Στο Σχ. 27-5α οι αντιστάσεις συνδέονται η μία μετά την άλλη μεταξύ των σημείων a και b και μια διαφορά δυναμικού διατηρείται μεταξύ των σημείων a και b από τη μπαταρία. Οι διαφορές δυναμικού που υπάρχουν κατά μήκος των αντιστάσεων σ' αυτή τη συνδεσμολογία παράγουν ίσα ρεύματα σε κάθε μία αντίσταση. Γενικά,



(α)



(β)

ΣΧΗΜΑ 27-5 (α) Τρεις αντιστάτες είναι συνδεδεμένοι σε σειρά μεταξύ των σημείων a και b . (β) Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, όπου οι τρεις αντιστάτες έχουν αντικατασταθεί με την ισοδύναμή τους αντίσταση R_{eq} .

Όταν εφαρμόζεται μια διαφορά δυναμικού V στα άκρα αντιστάσεων που είναι συνδεδεμένες σε σειρά, οι αντιστάσεις διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα i . Το άθροισμα των διαφορών δυναμικού στα άκρα των επιμέρους αντιστάσεων είναι ίσο με την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού V .

Παρατηρήστε πως το φορτίο που κινείται διαμέσου της σειράς των αντιστάσεων μπορεί να κινηθεί μέσω μίας και μοναδικής διαδρομής. Αν υπάρχουν περισσότερες διαδρομές, έτσι ώστε τα ρεύματα που διαρρέουν τις αντιστάσεις να είναι διαφορετικά, τότε οι αντιστάσεις δεν είναι συνδεδεμένες σε σειρά.

Μπορούμε να αντικαταστήσουμε αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά με μία ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} , η οποία έχει το ίδιο ρεύμα i και την ίδια συνολική διαφορά δυναμικού V όπως και οι αρχικές αντιστάσεις.

Το Σχ. 27-5β δείχνει την ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} που μπορεί να αντικαταστήσει τις τρεις αντιστάσεις του Σχ. 27-5α.

Προκειμένου να πάρουμε μια έκφραση για την R_{eq} του Σχ. 27-5β, εφαρμόζουμε τον κανόνα των βρόχων και στα δύο κυκλώματα. Για το Σχ. 27-5α, ξεκινώντας από το σημείο a και κινούμενοι αριστερόστροφα κατά μήκος του κυκλώματος, βρίσκουμε

$$\mathcal{E} - iR_1 - iR_2 - iR_3 = 0,$$

$$\text{ή} \quad i = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (27-5)$$

Για το Σχ. 27-5β, όπου οι τρεις αντιστάσεις έχουν αντικατασταθεί από μία και μοναδική ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} , βρίσκουμε

$$\mathcal{E} - iR_{\text{eq}} = 0, \\ \text{ή} \quad i = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{eq}}}. \quad (27-6)$$

Η σύγκριση της Εξ. 27-5 με την 27-6 δείχνει ότι

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Η επέκταση σε n αντιστάσεις είναι εύκολη και δίνεται από την

$$R_{\text{eq}} = \sum_{j=1}^n R_j \quad (n \text{ αντιστάσεις σε σειρά}). \quad (27-7)$$

Παρατηρήστε πως όταν οι αντιστάσεις συνδέονται σε σειρά, η ισοδύναμή τους αντίσταση είναι μεγαλύτερη από οποιαδήποτε από τις επιμέρους αντιστάσεις.



ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ 2 Στο Σχ. 27-5α, αν $R_1 > R_2 > R_3$, κατατάξτε σε φθίνουσα σειρά τις τρεις αντιστάσεις σύμφωνα με (α) το ρεύμα που τις διαρρέει και (β) τη διαφορά δυναμικού στα άκρα τους.

27-6 Διαφορά Δυναμικού Μεταξύ Δύο Σημείων

Συχνά θέλουμε να βρούμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων ενός κυκλώματος. Για παράδειγμα, στο Σχ. 27-6, πόση είναι η διαφορά δυναμικού $V_b - V_a$ μεταξύ των σημείων a και b ; Για να τη βρούμε, ας ξεκινήσουμε από το σημείο a (με δυναμικό V_a) και ας κινηθούμε διαμέσου της μπαταρίας για να φτάσουμε στο σημείο b (με δυναμικό V_b) ενώ παράλληλα καταγράφουμε τις διαφορές δυναμικού που συναντάμε. Καθώς περνάμε από την ΗΕΔ της μπαταρίας, το δυναμικό αυξάνεται κατά $\mathcal{E}$. Καθώς περνάμε από την εσωτερική αντίσταση r της μπαταρίας, κινούμαστε κατά τη κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος κι επομένως το δυναμικό μειώνεται κατά ir . Συνεπώς, καταλήγουμε στο δυναμικό του σημείου b και επομένως έχουμε

$$V_a + \mathcal{E} - ir = V_b, \\ \text{ή} \quad V_b - V_a = \mathcal{E} - ir. \quad (27-8)$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε αυτή την έκφραση, θα πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα i . Σημειώστε πως το κύκλωμα είναι ίδιο με εκείνο του Σχ. 27-4α, για το οποίο η Εξ. 27-4 δίνει το ρεύμα ως

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (27-9)$$

Αντικαθιστώντας την έκφραση αυτή στην Εξ. 27-8 έχουμε

$$V_b - V_a = \mathcal{E} - \frac{\mathcal{E}}{R + r} r \\ = \frac{\mathcal{E}}{R + r} R. \quad (27-10)$$

Τώρα, αντικαθιστώντας με τα δεδομένα του Σχ. 27-6 έχουμε

$$V_b - V_a = \frac{12 \text{ V}}{4.0 \Omega + 2.0 \Omega} 4.0 \Omega = 8.0 \text{ V}. \quad (27-11)$$

Υποθέστε, αντιθέτως, ότι μετακινούμαστε δεξιόστροφα από το σημείο a στο b , περνώντας διαμέσου του αντιστάτη R αντί της μπαταρίας. Επειδή κινούμαστε αντίθετα από την κατεύθυνση του ρεύματος, το δυναμικό αυξάνεται κατά iR . Επομένως,

$$\begin{aligned} V_a + iR &= V_b \\ \text{ή} \quad V_b - V_a &= iR. \end{aligned} \quad (27-12)$$

Αντικαθιστώντας το i από την Εξ. 27-9, βρίσκουμε και πάλι την Εξ. 27-10. Άρα, η αντικατάσταση των τιμών από το Σχ. 27-6 μας δίνει το ίδιο αποτέλεσμα, $V_b - V_a = 8.0 \text{ V}$. Γενικά,

➔ Για να βρείτε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σημείων ενός κυκλώματος, ξεκινάτε από το ένα σημείο και διατρέχετε το κύκλωμα έως το άλλο σημείο, ακολουθώντας οποιαδήποτε διαδρομή, αθροίζοντας αλγεβρικά τις διαφορές δυναμικού που συναντάτε.

Διαφορά Δυναμικού Κατά Μήκος μιας Πραγματικής Μπαταρίας

Στο Σχ. 27-6, τα σημεία a και b βρίσκονται στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Συνεπώς η διαφορά δυναμικού $V_b - V_a$ αποτελεί την από άκρο σε άκρο διαφορά δυναμικού V κατά μήκος της μπαταρίας. Από την Εξ. 27-8 βλέπουμε πως

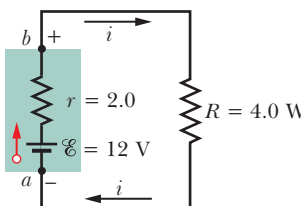
$$V = \mathcal{E} - ir. \quad (27-13)$$

Αν η εσωτερική αντίσταση r της μπαταρίας του Σχ. 27-6 ήταν μηδέν, η Εξ. 27-13 μας πληροφορεί πως η διαφορά δυναμικού V θα ήταν ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη της μπαταρίας, δηλαδή 12 V . Ωστόσο, επειδή $r = 2.0 \Omega$, η Εξ. 27-13 μας λέει πως η διαφορά δυναμικού V είναι μικρότερη από $\mathcal{E}$. Από την Εξ. 27-11, γνωρίζουμε πως το V είναι μόλις 8.0 V . Σημειώστε πως το αποτέλεσμα εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος που διαρρέει την μπαταρία. Αν η ίδια μπαταρία βρισκόταν σ' ένα διαφορετικό κύκλωμα και τη διέτρεε διαφορετικό ρεύμα, το V θα είχε άλλη τιμή.

Γειώνοντας ένα Κύκλωμα

Το Σχ. 27-7α δείχνει το ίδιο κύκλωμα με το Σχ. 27-6, με τη μόνη διαφορά πως εδώ το σημείο a είναι απευθείας συνδεδεμένο με το έδαφος, το οποίο το παριστάνουμε με το σύμβολο $\perp$. Η γείωση ενός κυκλώματος συνήθως σημαίνει πως συνδέουμε το κύκλωμα μέσω μιας αγωγικής διαδρομής με την επιφάνεια της Γης (στην πραγματικότητα η σύνδεση γίνεται με το αγωγίμο νοτισμένο χώμα και τον βράχο κάτω από την επιφάνεια). Εδώ, μια τέτοια σύνδεση σημαίνει απλά πως το δυναμικό ορίζεται να είναι μηδέν στο σημείο του κυκλώματος που γειώνουμε. Επομένως, στο Σχ. 27-7α το δυναμικό στο σημείο a ορίζεται να είναι $V_a = 0$. Η Εξ. 27-11 τώρα μας λέει πως το δυναμικό στο σημείο b είναι $V_b = 8.0 \text{ V}$.

Το Σχ. 27-7β δείχνει το ίδιο κύκλωμα, μόνο που τώρα το σημείο b συνδέεται απευθείας με το έδαφος. Επομένως, το δυναμικό εκεί ορίζεται να είναι $V_b = 0$. Η Εξ. 27-11 τώρα μας λέει πως το δυναμικό στο a είναι $V_a = -8.0 \text{ V}$.



ΣΧΗΜΑ 27-6 Τα σημεία a και b , που βρίσκονται στους ακροδέκτες μιας πραγματικής μπαταρίας, διαφέρουν ως προς το δυναμικό.

Ισχύς, Δυναμικό και ΗΕΔ

Όταν μια μπαταρία ή κάποια άλλου είδους ηλεκτρεγερτική συσκευή παράγει έργο στους φορείς φορτίου προκειμένου να δημιουργήσει ρεύμα i , η συσκευή μεταφέρει ενέργεια από την πηγή ενέργειάς της (όπως είναι η χημική ενέργεια στη μπαταρία) στους φορείς φορτίου. Επειδή μια πραγματική ηλεκτρεγερτική συσκευή έχει μια εσωτερική αντίσταση r , η συσκευή μετατρέπει επίσης ενέργεια σε εσωτερική θερμική ενέργεια, η οποία δαπανάται στην εσωτερική αντίσταση (Παράγραφος 26-7). Ας συνδέσουμε αυτές τις μετατροπές.

Ο συνολικός ρυθμός P με τον οποίο μεταφέρεται ενέργεια από την ηλεκτρεγερτική συσκευή στους φορείς ηλεκτρικού φορτίου δίνεται από την Εξ. 26-26:

$$P = iV, \quad (27-14)$$

όπου V είναι το δυναμικό κατά μήκος των ακροδεκτών της ηλεκτρεγερτικής συσκευής. Από την Εξ. 27-13, μπορούμε να αντικαταστήσουμε $V = \mathcal{E} - ir$ στην Εξ. 27-14 για να βρούμε

$$P = i(\mathcal{E} - ir) = i\mathcal{E} - i^2r. \quad (27-15)$$

Από την Εξ. 26-27 μπορούμε να αναγνωρίσουμε τον όρο i^2r στην Εξ. 27-15 ως το ρυθμό P_r της ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια εντός της ηλεκτρεγερτικής συσκευής,

$$P_r = i^2r \quad (\text{εσωτερικός ρυθμός απώλειας}). \quad (27-16)$$

Τότε ο όρος $i\mathcal{E}$ στην Εξ. 27-15 πρέπει να είναι ο ρυθμός P_{emf} με τον οποίο η ηλεκτρεγερτική συσκευή και μεταφέρει ενέργεια προς τους φορείς φορτίου, αλλά και μετατρέπει ενέργεια σε εσωτερική θερμική ενέργεια. Επομένως,

$$P_{\text{emf}} = i\mathcal{E} \quad (\text{ισχύος ηλεκτρεγερτικής συσκευής}). \quad (27-17)$$

Αν μια μπαταρία επαναφορτίζεται, ενώ τη διαπερνά ρεύμα «λανθασμένης κατεύθυνσης», τότε η μεταφορά ενέργειας γίνεται από τους φορείς του φορτίου προς τη μπαταρία, δηλαδή τόσο προς τη χημική ενέργεια της μπαταρίας όσο και προς την ενέργεια που δαπανάται στην εσωτερική αντίσταση r . Ο ρυθμός μεταβολής της χημικής ενέργειας δίνεται από την Εξ. 27-17, ο ρυθμός απώλειας ενέργειας δίνεται από την Εξ. 27-16 και ο ρυθμός με τον οποίο οι φορείς φορτίου παρέχουν ενέργεια δίνεται από την Εξ. 27-14.



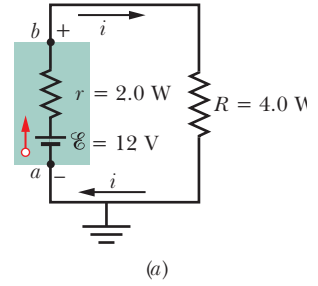
ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ 3 Μια μπαταρία έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη 12 V και εσωτερική αντίσταση 2 Ω. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της είναι μεγαλύτερη, μικρότερη ή ίση με 12 V αν το ρεύμα στη μπαταρία (α) έχει κατεύθυνση από τον αρνητικό προς το θετικό ακροδέκτη, (β) έχει κατεύθυνση από το θετικό προς τον αρνητικό ακροδέκτη και (γ) είναι μηδενικό;

Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-1

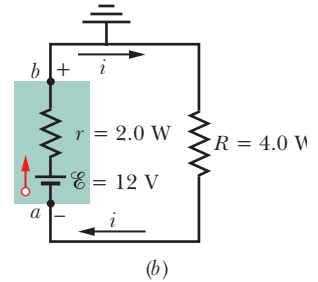
Οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις και οι αντιστάσεις στο κύκλωμα του Σχ. 27-8α έχουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= 4.4 \text{ V}, \quad \mathcal{E}_2 = 2.1 \text{ V}, \\ r_1 &= 2.3 \Omega, \quad r_2 = 1.8 \Omega, \quad R = 5.5 \Omega. \end{aligned}$$

(α) Πόσο είναι το ρεύμα i στο κύκλωμα;



(α)

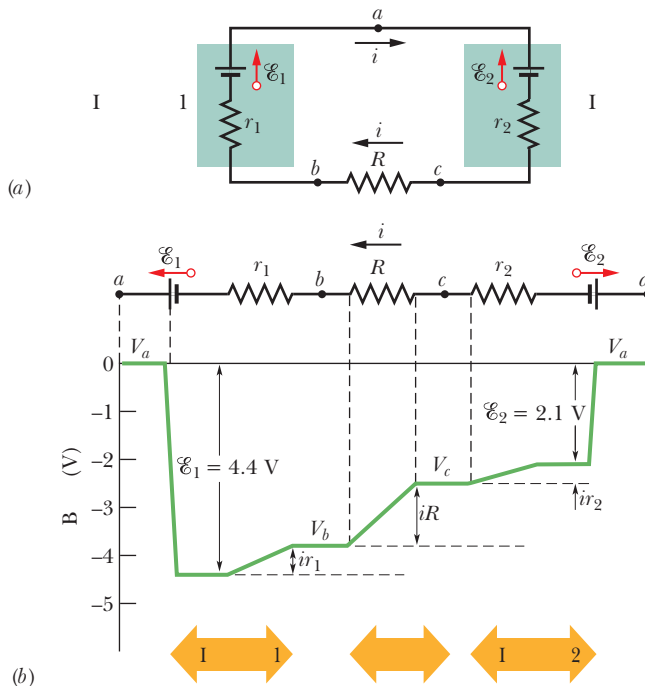


(β)

ΣΧΗΜΑ 27-7 (α) Το σημείο a συνδέεται απευθείας σε γείωση. (β) Το σημείο b συνδέεται απευθείας σε γείωση.

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ: Μπορούμε να έχουμε μια έκφραση του ρεύματος i σ' αυτό το κύκλωμα του ενός βρόχου εφαρμόζοντας τον κανόνα των βρόχων.

Υπολογισμοί: Αν και δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη σωστή κατεύθυνση του i , μπορούμε εύκολα να την καθορίσουμε από τις ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις των



ΣΧΗΜΑ 27-8 (α) Ένα κύκλωμα ενός βρόχου που περιλαμβάνει δύο πραγματικές μπαταρίες και έναν αντιστάτη. Οι μπαταρίες αντιτίθενται η μία στην άλλη, τείνουν δηλαδή να στέλνουν ρεύμα σε αντίθετες κατευθύνσεις μέσω του αντιστάτη. (β) Μια γραφική παράσταση των δυναμικών, δεξιόστροφα από το σημείο a , με το δυναμικό του σημείου a να έχει τεθεί αυθαίρετα ίσο με μηδέν. (Για να καταλάβετε καλύτερα πώς σχετίζεται το κύκλωμα με τη γραφική παράσταση, φανταστείτε πως κόβετε το κύκλωμα στο σημείο a και στη συνέχεια ξεδιπλώνετε την αριστερή πλευρά του κυκλώματος προς τα αριστερά και τη δεξιά πλευρά του κυκλώματος προς τα δεξιά.)

δύο μπαταριών. Επειδή η $\mathcal{E}_1$ είναι μεγαλύτερη από την $\mathcal{E}_2$, η μπαταρία 1 ελέγχει την κατεύθυνση του ρεύματος i , οπότε η κατεύθυνση είναι αριστερόστροφη. Ας εφαρμόσουμε τώρα τον κανόνα των βρόχων κινούμενοι δεξιόστροφα, δηλαδή αντίθετα από το ρεύμα, και ξεκινώντας από το σημείο a . Βρίσκουμε

$$-\mathcal{E}_1 + ir_1 + iR + ir_2 + \mathcal{E}_2 = 0.$$

Παρατηρήστε πως προκύπτει η ίδια εξίσωση αν εφαρμόσουμε τον κανόνα των βρόχων αριστερόστροφα ή αν ξεκινήσουμε από κάποιο άλλο σημείο, διαφορετικό του a . Επίσης, αφιερώστε λίγο χρόνο για να συγκρίνετε αυτή την εξίσωση, όρο προς όρο, με το Σχ. 27-8β, που δείχνει τις διαφορές δυναμικού γραφικά (όπου αυθαίρετα έχουμε πάρει το δυναμικό στο σημείο a να είναι μηδέν).

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση βρόχου ως προς το ρεύμα i , έχουμε

$$i = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{R + r_1 + r_2} = \frac{4.4 \text{ V} - 2.1 \text{ V}}{5.5 \Omega + 2.3 \Omega + 1.8 \Omega} = 0.2396 \text{ A} \approx 240 \text{ mA}. \quad (\text{Απάντηση})$$

(β) Πόση είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της μπαταρίας 1 στο Σχ. 27-8α;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ: Πρέπει ν' αθροίσουμε τις διαφορές δυναμικού ανάμεσα στα σημεία a και b .

Υπολογισμοί: Ας ξεκινήσουμε από το σημείο b (δηλαδή από τον αρνητικό ακροδέκτη της μπαταρίας 1) και ας διατρέξουμε το κύκλωμα αριστερόστροφα, διαμέσου της μπαταρίας 1 μέχρι το σημείο a (δηλαδή μέχρι τον θετικό ακροδέκτη), καταγράφοντας τις διαφορές δυναμικού. Βρίσκουμε ότι

$$V_b - ir_1 + \mathcal{E}_1 = V_a,$$

η οποία μας δίνει

$$\begin{aligned} V_a - V_b &= -ir_1 + \mathcal{E}_1 \\ &= -(0.2396 \text{ A})(2.3 \Omega) + 4.4 \text{ V} \\ &= +3.84 \text{ V} \approx 3.8 \text{ V}, \quad (\text{Απάντηση}) \end{aligned}$$

η οποία είναι μικρότερη από την ΗΕΔ της μπαταρίας. Μπορείτε να επιβεβαιώσετε αυτό το αποτέλεσμα ξεκινώντας από το σημείο b στο Σχ. 27-8α και διατρέχοντας το κύκλωμα δεξιόστροφα μέχρι το σημείο a .

ΤΑΚΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

ΤΑΚΤΙΚΗ 1: Η Υπόθεση για την Κατεύθυνση ενός Ρεύματος Μπορεί να είναι Αυθαίρετη Επιλογή Κατά την επίλυση προβλημάτων με κυκλώματα δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζετε την κατεύθυνση του ρεύματος εκ των προτέρων. Μπορείτε απλά να υποθέσετε την κατεύθυνσή του, αν και αυτό χρειάζεται ένα βαθμό άνεσης από πλευράς σας. Υποθέστε λοιπόν πως το ρεύμα στο Σχ. 27-8α έχει δεξιόστροφη κατεύθυνση, αντιστρέψτε δηλαδή την κατεύθυνση των βελών του ρεύματος που φαίνονται. Εφαρμόζοντας τον κανόνα των βρόχων, ξεκινώντας από το σημείο a και διατρέχοντας το κύκλωμα δεξιόστροφα,

$$\text{βρίσκουμε} \quad -\mathcal{E}_1 - ir_1 - iR - ir_2 + \mathcal{E}_2 = 0,$$

$$\text{ή} \quad i = -\frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{R + r_1 + r_2}.$$

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές από το Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-1 έχουμε $i = -240 \text{ mA}$ για το ρεύμα. Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει πως η κατεύθυνση του ρεύματος είναι αντίθετη αυτής που υποθέσαμε αρχικά.

27-7 Κυκλώματα Πολλαπλών Βρόχων

Το Σχ. 27-9 δείχνει ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει περισσότερους από έναν βρόχους. Για μεγαλύτερη ευκολία, υποθέτουμε ότι οι μπαταρίες είναι ιδανικές. Υπάρχουν δύο κόμβοι σ' αυτό το κύκλωμα, στα σημεία b και d , και υπάρχουν τρεις κλάδοι που συνδέουν αυτούς τους κόμβους. Οι κλάδοι είναι ο αριστερός κλάδος (bad), ο δεξιός κλάδος (bcd) και ο κεντρικός κλάδος (bd). Πόσο είναι το ρεύμα σε αυτούς τους τρεις κλάδους;

Συμβολίζουμε τα ρεύματα αυθαίρετα, χρησιμοποιώντας διαφορετικό δείκτη για κάθε κλάδο. Το ρεύμα i_1 έχει την ίδια τιμή κατά μήκος του κλάδου bad , το ρεύμα i_2 έχει την ίδια τιμή κατά μήκος του κλάδου bcd και το ρεύμα i_3 είναι το ρεύμα στον κλάδο bd . Οι κατευθύνσεις αυτών των ρευμάτων επιλέγονται αυθαίρετα.

Ας εξετάσουμε τώρα τον κόμβο d . Ένα φορτίο εισέρχεται σ' αυτό τον κόμβο μέσω των εισερχόμενων ρευμάτων i_1 και i_3 , ενώ απομακρύνεται από αυτόν τον κόμβο μέσω του εξερχόμενου ρεύματος i_2 . Επειδή δεν υπάρχει μεταβολή στην ποσότητα του φορτίου στον κόμβο, το συνολικό εισερχόμενο ρεύμα πρέπει να ισούται με το συνολικό εξερχόμενο ρεύμα:

$$i_1 + i_3 = i_2. \quad (27-18)$$

Μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε πως η εφαρμογή της ίδιας συνθήκης στον κόμβο b οδηγεί ακριβώς στην ίδια εξίσωση. Η Εξ. 27-18 επομένως υποδεικνύει μια γενική αρχή:

ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ: Το άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε οποιονδήποτε κόμβο πρέπει να είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων που εξέρχονται από αυτόν.

Ο κανόνας αυτός αναφέρεται συχνά ως *κανόνας κόμβων του Kirchhoff* (ή *νόμος ρευμάτων του Kirchhoff*). Αποτελεί απλά μια διατύπωση της αρχής διατήρησης του φορτίου για μια σταθερή ροή φορτίου: δεν υπάρχει ούτε συσσώρευση ούτε απώλεια φορτίου σ' έναν κόμβο. Επομένως, τα βασικά μας εργαλεία για την επίλυση σύνθετων κυκλωμάτων είναι ο κανόνας των βρόχων (ο οποίος βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας) και ο κανόνας των κόμβων (ο οποίος βασίζεται στην αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου).

Η Εξ. 27-18 είναι μία εξίσωση με τρεις αγνώστους. Προκειμένου να επιλύσουμε το κύκλωμα (δηλαδή, να υπολογίσουμε τις τιμές και των τριών ρευμάτων), χρειαζόμαστε δύο ακόμα εξισώσεις που να περιλαμβάνουν τους ίδιους αυτούς αγνώστους. Τις εξισώσεις αυτές τις παίρνουμε εφαρμόζοντας τον κανόνα των βρόχων δύο φορές. Για το κύκλωμα του Σχ. 27-9 έχουμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε τρεις βρόχους: τον αριστερό βρόχο ($badb$), τον δεξιό βρόχο ($bcd b$) και το μεγάλο βρόχο ($badcb$). Δεν έχει σημασία ποιους δύο βρόχους θα επιλέξουμε. Έστω ότι επιλέγουμε τον αριστερό και τον δεξιό βρόχο.

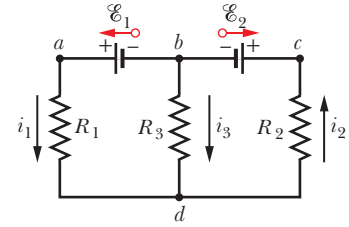
Αν διατρέξουμε τον αριστερό βρόχο δεξιόστροφα, ξεκινώντας από το σημείο b , ο κανόνας των βρόχων μας δίνει

$$\mathcal{E}_1 - i_1 R_1 + i_3 R_3 = 0. \quad (27-19)$$

Αν διατρέξουμε το δεξιό βρόχο δεξιόστροφα, ξεκινώντας από το σημείο b , ο κανόνας των βρόχων μας δίνει

$$-i_3 R_3 - i_2 R_2 - \mathcal{E}_2 = 0. \quad (27-20)$$

Τώρα έχουμε τρεις εξισώσεις (Εξ. 27-18, 27-19 και 27-20) με τα τρία άγνωστα ρεύματα, τις οποίες μπορούμε να λύσουμε με ένα πλήθος διαφορετικών τεχνικών.



ΣΧΗΜΑ 27-9 Ένα κύκλωμα πολλαπλών βρόχων, που αποτελείται από τρεις κλάδους: τον αριστερό κλάδο bad , τον δεξιό κλάδο bcd και τον κεντρικό κλάδο bd . Το κύκλωμα επίσης αποτελείται από τρεις βρόχους: τον αριστερό βρόχο $badb$, το δεξιό βρόχο $bcd b$ και τον μεγάλο βρόχο $badcb$.

Αν είχαμε εφαρμόσει τον κανόνα των βρόχων στο μεγάλο βρόχο του κυκλώματος, θα είχαμε πάρει (κινούμενοι δεξιόστροφα και ξεκινώντας από το b) την εξίσωση

$$\mathcal{E}_1 - i_1 R_1 - i_2 R_2 - \mathcal{E}_2 = 0.$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να φαίνεται πως μας δίνει νέες πληροφορίες για το κύκλωμα, στην πραγματικότητα όμως είναι απλά το άθροισμα των Εξ. 27-19 και 27-20. (Ωστόσο, η χρήση της τελευταίας εξίσωσης με την Εξ. 27-18 και μια εκ των Εξ. 27-19 ή 27-20 θα μας έδινε επίσης τα σωστά αποτελέσματα.)

Παράλληλη Σύνδεση Αντιστάσεων

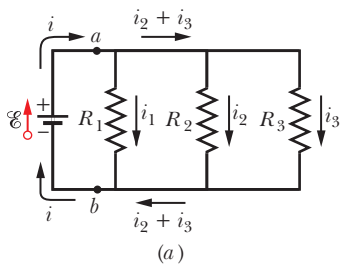
Το Σχ. 27-10α δείχνει τρεις αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα με μία ιδανική μπαταρία ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Ο όρος «παράλληλα» σημαίνει πως οι αντιστάσεις είναι απευθείας συνδεδεμένες στη μία πλευρά τους και απευθείας συνδεδεμένες στην άλλη πλευρά τους, και πως μια διαφορά δυναμικού V εφαρμόζεται στο ζεύγος των συνδεδεμένων τους άκρων. Συνεπώς, και οι τρεις αντιστάσεις έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού V , η οποία παράγει ρεύμα σε καθεμιά από αυτές. Γενικά,

➔ Όταν μια διαφορά δυναμικού V εφαρμόζεται στα άκρα αντιστάσεων που είναι συνδεδεμένες παράλληλα, όλες οι αντιστάσεις έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού V .

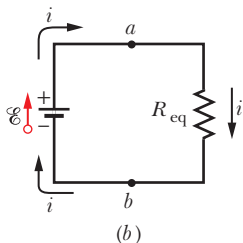
Στο Σχ. 27-10α η εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού V διατηρείται από την μπαταρία. Στο Σχ. 27-10β οι τρεις παράλληλες αντιστάσεις έχουν αντικατασταθεί από μία ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} .

Αντιστάσεις που είναι συνδεδεμένες παράλληλα, μπορούν να αντικατασταθούν από μία ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} , η οποία έχει την ίδια διαφορά δυναμικού V και το ίδιο συνολικό ρεύμα i με τις πραγματικές αντιστάσεις.

➔ Θα πρέπει να θυμάστε πως η ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} και όλες οι παράλληλα συνδεδεμένες αντιστάσεις έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού V .



(α)



(β)

ΣΧΗΜΑ 27-10 (α) Τρεις αντιστάτες συνδεδεμένοι παράλληλα μεταξύ των σημείων a και b . (β) Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, όπου οι τρεις αντιστάτες έχουν αντικατασταθεί από την ισοδύναμη αντίστασή τους R_{eq} .

Για να βρούμε μια έκφραση για την αντίσταση R_{eq} στην Εξ. 27-10β, πρώτα γράφουμε το ρεύμα που διαρρέει καθεμιά πραγματική αντίσταση στο Σχ. 27-10α σαν

$$i_1 = \frac{V}{R_1}, \quad i_2 = \frac{V}{R_2}, \quad \text{and} \quad i_3 = \frac{V}{R_3},$$

όπου V είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα σημεία a και b . Αν εφαρμόσουμε τον κανόνα των κόμβων στο σημείο a του Σχ. 27-10α και στη συνέχεια αντικαταστήσουμε τις τιμές αυτές, βρίσκουμε

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right). \quad (27-21)$$

Αν αντικαθιστούσαμε το συνδυασμό παράλληλων αντιστάσεων με μια ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} (Σχ. 27-10β), θα είχαμε

$$i = \frac{V}{R_{\text{eq}}}. \quad (27-22)$$

Συγκρίνοντας τις Εξ. 27-21 και 27-22 οδηγούμαστε στην

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (27-23)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 27-1

Αντιστάτες και Πυκνωτές σε Σειρά και Παράλληλα

Σε σειρά	Παράλληλα	Σε σειρά	Παράλληλα
Αντιστάτες		Πυκνωτές	
$R_{eq} = \sum_{j=1}^n R_j$ Εξ. 27-7	$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}$ Εξ. 27-24	$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}$ Εξ. 25-20	$C_{eq} = \sum_{j=1}^n C_j$ Εξ. 25-19
Ίδιο ρεύμα σε όλους τους αντιστάτες	Ίδια διαφορά δυναμικού στα άκρα όλων των αντιστατών	Ίδιο φορτίο σε όλους τους πυκνωτές	Ίδια διαφορά δυναμικού στα άκρα όλων των πυκνωτών

Επεκτείνοντας αυτό το αποτέλεσμα στην περίπτωση n αντιστάσεων, έχουμε

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j} \quad (n \text{ αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα}). \quad (27-24)$$

Για την περίπτωση δύο αντιστάσεων, η ισοδύναμη αντίσταση είναι το γινόμενο τους διαιρεμένο με το άθροισμά τους, δηλαδή

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (27-25)$$

Αν κατά λάθος παίρνατε την ισοδύναμη αντίσταση σαν το άθροισμα των αντιστάσεων διαιρεμένο με το γινόμενο τους, θα διαπιστώνατε πως αυτό το αποτέλεσμα θα ήταν λάθος από άποψη διαστάσεων.

Σημειώστε πως όταν δύο ή περισσότερες αντιστάσεις συνδέονται παράλληλα, η ισοδύναμη αντίσταση είναι μικρότερη από οποιαδήποτε άλλη από τις επιμέρους αντιστάσεις. Ο Πίνακας 27-1 συνοψίζει τις σχέσεις ισοδυναμίας για αντιστάσεις και πυκνωτές που συνδέονται σε σειρά και παράλληλα.



ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ 4 Μια μπαταρία, με διαφορά δυναμικού V στα άκρα της, είναι συνδεδεμένη μ' ένα συνδυασμό δύο πανομοιότυπων αντιστατών και τη διαρρέει ρεύμα i . Πόση είναι η διαφορά δυναμικού στα άκρα των αντιστατών και η ένταση του ρεύματος που τους διαρρέει, αν οι αντιστάτες είναι συνδεδεμένοι (α) σε σειρά και (β) παράλληλα;

Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-2 Αναπτύξτε τις ικανότητές σας

Το Σχ. 27-11α δείχνει ένα κύκλωμα πολλαπλών βρόχων, το οποίο περιλαμβάνει μια ιδανική μπαταρία και τέσσερις αντιστάσεις με τις ακόλουθες τιμές:

$$R_1 = 20 \, \Omega, \quad R_2 = 20 \, \Omega, \quad \mathcal{E} = 12 \, \text{V}, \\ R_3 = 30 \, \Omega, \quad R_4 = 8.0 \, \Omega.$$

(α) Πόσο είναι το ρεύμα που διαρρέει τη μπαταρία;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ: Παρατηρώντας ότι το ρεύμα που διαρρέει τη μπαταρία πρέπει να είναι ίσο με το ρεύμα που

διαρρέει την αντίσταση R_1 , βλέπουμε πως θα μπορούσαμε να βρούμε το ρεύμα εφαρμόζοντας τον κανόνα των βρόχων σ' ένα βρόχο που περιλαμβάνει την R_1 , επειδή το ρεύμα αυτό θα συμπεριλαμβανόταν στη διαφορά δυναμικού στα άκρα της R_1 .

Λανθασμένη Μέθοδος: Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε τον αριστερό βρόχο είτε το μεγάλο βρόχο του κυκλώματος. Παρατηρώντας ότι το βέλος της ΗΕΔ της μπαταρίας δείχνει προς τα πάνω, οπότε το ρεύμα που παρέχει η μπαταρία έχει αριστερόστροφη κατεύθυνση,

θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε τον κανόνα των βρόχων στον αριστερό βρόχο του κυκλώματος ξεκινώντας από το σημείο a και διατρέχοντας το βρόχο αριστερόστροφα. Συμβολίζοντας με i το ρεύμα που διαρρέει τη μπαταρία, θα παίρναμε

$$+ \mathcal{E} - iR_1 - iR_2 - iR_4 = 0 \quad (\text{incorrect}).$$

Ωστόσο, η εξίσωση αυτή είναι λανθασμένη επειδή υποθέτει ότι οι αντιστάσεις R_1 , R_2 και R_4 διαρρέονται όλες από το ίδιο ρεύμα i . Οι αντιστάσεις R_1 και R_4 όντως έχουν το ίδιο ρεύμα, επειδή το ρεύμα που διαρρέει την R_4 πρέπει να διαρρέει και την μπαταρία και στη συνέχεια την R_1 χωρίς καμιά μεταβολή στην τιμή του. Ωστόσο, το ρεύμα αυτό διακλαδίζεται στον κόμβο b και μόνο ένα μέρος του διαρρέει την R_2 , ενώ το υπόλοιπο διαρρέει την R_3 .

Αδιέξοδη Μέθοδος: Για να διακρίνουμε τα διάφορα ρεύματα του κυκλώματος, πρέπει να τους δώσουμε διαφορετικά σύμβολα όπως στο Σχ. 27-11β. Τότε, ξεκινώντας από το σημείο a και διατρέχοντας τον αριστερό βρόχο του κυκλώματος αριστερόστροφα, έχουμε

$$+ \mathcal{E} - i_1 R_1 - i_2 R_2 - i_1 R_4 = 0.$$

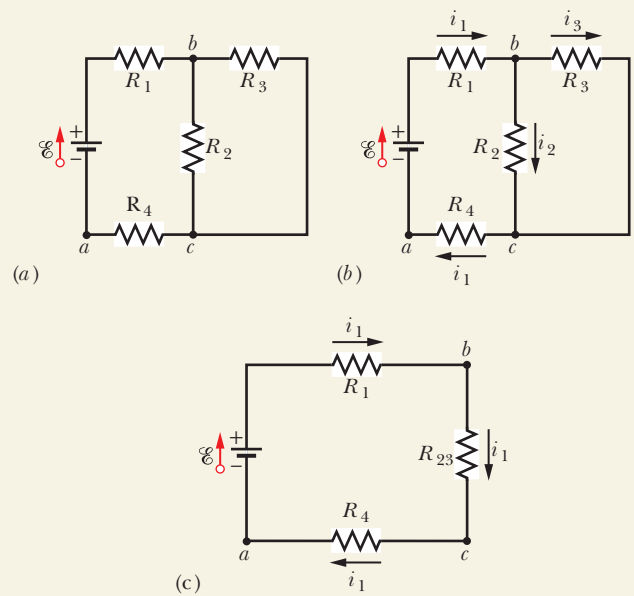
Δυστυχώς, αυτή η εξίσωση περιλαμβάνει δύο αγνώστους, τα ρεύματα i_1 και i_2 κι επομένως θα χρειάζομασταν τουλάχιστον άλλη μια εξίσωση προκειμένου να υπολογίσουμε τις τιμές τους.

Επιτυχής Μέθοδος: Ο καλύτερος τρόπος είναι να απλοποιήσουμε το κύκλωμα του Σχ. 27-11β υπολογίζοντας ισοδύναμες αντιστάσεις. Προσέξτε ότι οι R_1 και R_2 δεν είναι συνδεδεμένες σε σειρά κι επομένως δεν μπορούν να αντικατασταθούν από μια ισοδύναμη αντίσταση. Ωστόσο, οι R_2 και R_3 είναι συνδεδεμένες παράλληλα, άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε την Εξ. 27-24 είτε την Εξ. 27-25 για να υπολογίσουμε την ισοδύναμή τους αντίσταση R_{23} . Από την τελευταία έχουμε,

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(20 \, \Omega)(30 \, \Omega)}{50 \, \Omega} = 12 \, \Omega.$$

Μπορούμε τώρα να επανασχεδιάσουμε το κύκλωμα όπως φαίνεται στο Σχ. 27-11γ. Σημειώστε πως το ρεύμα που διαρρέει την R_{23} είναι το i_1 επειδή το φορτίο που περνάει από τις R_1 και R_4 πρέπει επίσης να περνάει από την R_{23} . Γι' αυτό το απλό κύκλωμα ενός βρόχου, ο κανόνας των βρόχων (εφαρμοζόμενος αριστερόστροφα και ξεκινώντας από το σημείο a) δίνει

$$+ \mathcal{E} - i_1 R_1 - i_1 R_{23} - i_1 R_4 = 0.$$



ΣΧΗΜΑ 27-11 (α) Ένα κύκλωμα πολλαπλών βρόχων με μια ιδανική μπαταρία με ΗΕΔ και τέσσερις αντιστάσεις. (β) Τα ρεύματα που θεωρούμε πως διαρρέουν τις αντιστάσεις. (γ) Μια απλοποίηση του κυκλώματος, με τις αντιστάσεις R_2 και R_3 να έχουν αντικατασταθεί από την ισοδύναμη αντίστασή τους R_{23} . Το ρεύμα που διαρρέει την R_{23} είναι ίσο με εκείνο που διαρρέει τις R_1 και R_4 .

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα της εκφώνησης, βρίσκουμε

$$12 \, \text{V} - i_1(20 \, \Omega) - i_1(12 \, \Omega) - i_1(8.0 \, \Omega) = 0,$$

η οποία μας δίνει

$$i_1 = \frac{12 \, \text{V}}{40 \, \Omega} = 0.30 \, \text{A}. \quad (\text{Απάντηση})$$

(β) Πόσο είναι το ρεύμα i_2 που διαρρέει την R_2 ;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ: (1) Τώρα πρέπει να δουλέψουμε αντίστροφα από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 27-11γ, όπου η R_{23} έχει αντικαταστήσει τις R_2 και R_3 . (2) Επειδή οι R_2 και R_3 είναι παράλληλα συνδεδεμένες, και οι δύο παρουσιάζουν την ίδια διαφορά δυναμικού με την R_{23} στα άκρα τους.

Δουλεύοντας αντίστροφα: Γνωρίζουμε πως το ρεύμα που διαρρέει την R_{23} είναι $i_1 = 0.30 \, \text{A}$. Επομένως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την Εξ. 26-8 ($R = V/i$) για να βρούμε τη διαφορά δυναμικού V_{23} στα άκρα της R_{23} :

$$V_{23} = i_1 R_{23} = (0.30 \, \text{A})(12 \, \Omega) = 3.6 \, \text{V}.$$

Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της R_2 είναι επομένως 3.6 V, οπότε το ρεύμα i_2 στην R_2 πρέπει να είναι, από την Εξ. 26-8,

$$i_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{3.6 \, \text{V}}{20 \, \Omega} = 0.18 \, \text{A}. \quad (\text{Απάντηση})$$

(γ) Πόσο είναι το ρεύμα i_3 που διαρρέει την R_3 ;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ: Μπορούμε να απαντήσουμε χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική όπως στο ερώτημα (β), ή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξής ιδέα: Ο κανόνας των κόμβων μας λέει πως στο σημείο b

του Σχ. 27-11β, το εισερχόμενο ρεύμα i_1 και τα εξερχόμενα ρεύματα i_2 και i_3 συνδέονται με την

$$i_1 = i_2 + i_3.$$

Υπολογισμός: Αναδιατάσσοντας αυτόν τον κανόνα των κόμβων έχουμε

$$i_3 = i_1 - i_2 = 0.30 \text{ A} - 0.18 \text{ A} = 0.12 \text{ A}. \quad (\text{Απάντηση})$$

Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-3

Το Σχ. 27-12 δείχνει ένα κύκλωμα, τα στοιχεία του οποίου έχουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\mathcal{E}_1 = 3.0 \text{ V}, \quad \mathcal{E}_2 = 6.0 \text{ V},$$

$$R_1 = 2.0 \, \Omega, \quad R_2 = 4.0 \, \Omega.$$

Οι τρεις μπαταρίες είναι ιδανικές μπαταρίες. Να βρείτε την ένταση και την κατεύθυνση του ρεύματος σε κάθε έναν από τους τρεις κλάδους.

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ: Δεν αξίζει τον κόπο να προσπαθήσουμε να απλοποιήσουμε αυτό το κύκλωμα, επειδή δεν υπάρχει κάποιο ζεύγος αντιστάτων που να είναι συνδεδεμένοι παράλληλα και οι αντιστάτες που είναι σε σειρά (αυτοί στον δεξιό κλάδο ή αυτοί στον αριστερό κλάδο) δεν αποτελούν πρόβλημα. Επομένως, το σχέδιό μας είναι να εφαρμόσουμε τους κανόνες των κόμβων και των βρόχων.

Κανόνας των κόμβων: Χρησιμοποιώντας αυθαίρετα επιλεγμένες κατευθύνσεις για τα ρεύματα όπως φαίνεται στο Σχ. 27-12, εφαρμόζουμε τον κανόνα των κόμβων στο σημείο a γράφοντας

$$i_3 = i_1 + i_2. \quad (27-26)$$

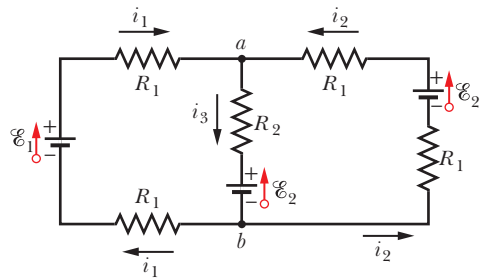
Εφαρμογή του κανόνα των κόμβων στον κόμβο b δίνει απλά την ίδια εξίσωση, επομένως στη συνέχεια εφαρμόζουμε τον κανόνα των βρόχων σε οποιουδήποτε δύο από τους τρεις βρόχους του κυκλώματος.

Αριστερός βρόχος: Αρχικά επιλέγουμε αυθαίρετα τον αριστερό βρόχο, ξεκινώντας αυθαίρετα από το σημείο b και διατρέχουμε επίσης αυθαίρετα αυτό τον βρόχο αριστερόστροφα, παίρνοντας

$$-i_1 R_1 + \mathcal{E}_1 - i_1 R_1 - (i_1 + i_2) R_2 - \mathcal{E}_2 = 0,$$

όπου έχουμε χρησιμοποιήσει $(i_1 + i_2)$ αντί του i_3 στον μεσαίο κλάδο. Αντικαθιστώντας με τα δεδομένα της εκφώνησης και κάνοντας την απλοποίηση έχουμε

$$i_1(8.0 \, \Omega) + i_2(4.0 \, \Omega) = -3.0 \text{ V}. \quad (27-27)$$



ΣΧΗΜΑ 27-12 Ένα κύκλωμα πολλαπλών βρόχων με τρεις ιδανικές μπαταρίες και πέντε αντιστάσεις.

Δεξιός βρόχος: Για τη δεύτερη εφαρμογή του κανόνα των βρόχων, επιλέγουμε αυθαίρετα να διατρέξουμε τον δεξιό βρόχο δεξιόστροφα ξεκινώντας από το σημείο b , βρίσκοντας

$$-i_2 R_1 + \mathcal{E}_2 - i_2 R_1 - (i_1 + i_2) R_2 - \mathcal{E}_2 = 0.$$

Αντικαθιστώντας με τα δεδομένα της εκφώνησης και κάνοντας την απλοποίηση έχουμε

$$i_1(4.0 \, \Omega) + i_2(8.0 \, \Omega) = 0. \quad (27-28)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις: Τώρα έχουμε ένα σύστημα δύο εξισώσεων (Εξ. 27-27 και 27-28) με δύο αγνώστους (i_1 και i_2) για να το λύσουμε είτε «με το χέρι» (το οποίο είναι αρκετά εύκολο εδώ) είτε χρησιμοποιώντας κάποιο «μαθηματικό πακέτο». (Μια τεχνική επίλυσης αποτελεί και ο κανόνας του Cramer, ο οποίος δίνεται στο Παράρτημα Ε.) Βρίσκουμε λοιπόν ότι

$$i_1 = -0.50 \text{ A}. \quad (27-29)$$

(Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει πως η αυθαίρετη επιλογή μας για τη κατεύθυνση του i_1 στο Σχ. 27-12 είναι λανθασμένη, αλλά θα πρέπει να περιμένουμε προτού τη διορθώσουμε.) Αντικαθιστώντας $i_1 = -0.50 \text{ A}$ στην Εξ. 27-28 και λύνοντας ως προς i_2 μας δίνει

$$i_2 = 0.25 \text{ A}. \quad (\text{Απάντηση})$$

Με την Εξ. 27-26 κατόπιν βρίσκουμε ότι

$$i_3 = i_1 + i_2 = -0.50 \text{ A} + 0.25 \text{ A} = -0.25 \text{ A}.$$

Το θετικό αποτέλεσμα που πήραμε για το i_2 σημαίνει πως η επιλογή μας για τη κατεύθυνση αυτού του ρεύματος είναι σωστή. Ωστόσο, τα αρνητικά αποτελέσματα για τα i_1 και i_3 δηλώνουν πως οι επιλογές μας γι' αυτά τα ρεύματα είναι λανθασμένες. Επομένως, σαν τελευταίο βήμα, διορθώνουμε τις απαντήσεις αντιστρέφοντας τα

βέλη για τα i_1 και i_3 στο Σχ. 27-12 και στη συνέχεια γράφουμε

$$i_1 = 0.50 \text{ A} \quad \text{και} \quad i_3 = 0.25 \text{ A}. \quad (\text{Απάντηση})$$

Προσοχή: Τέτοιου είδους διορθώσεις πρέπει να γίνονται πάντα στο τέλος και αφού έχετε υπολογίσει πρώτα όλα τα ρεύματα.

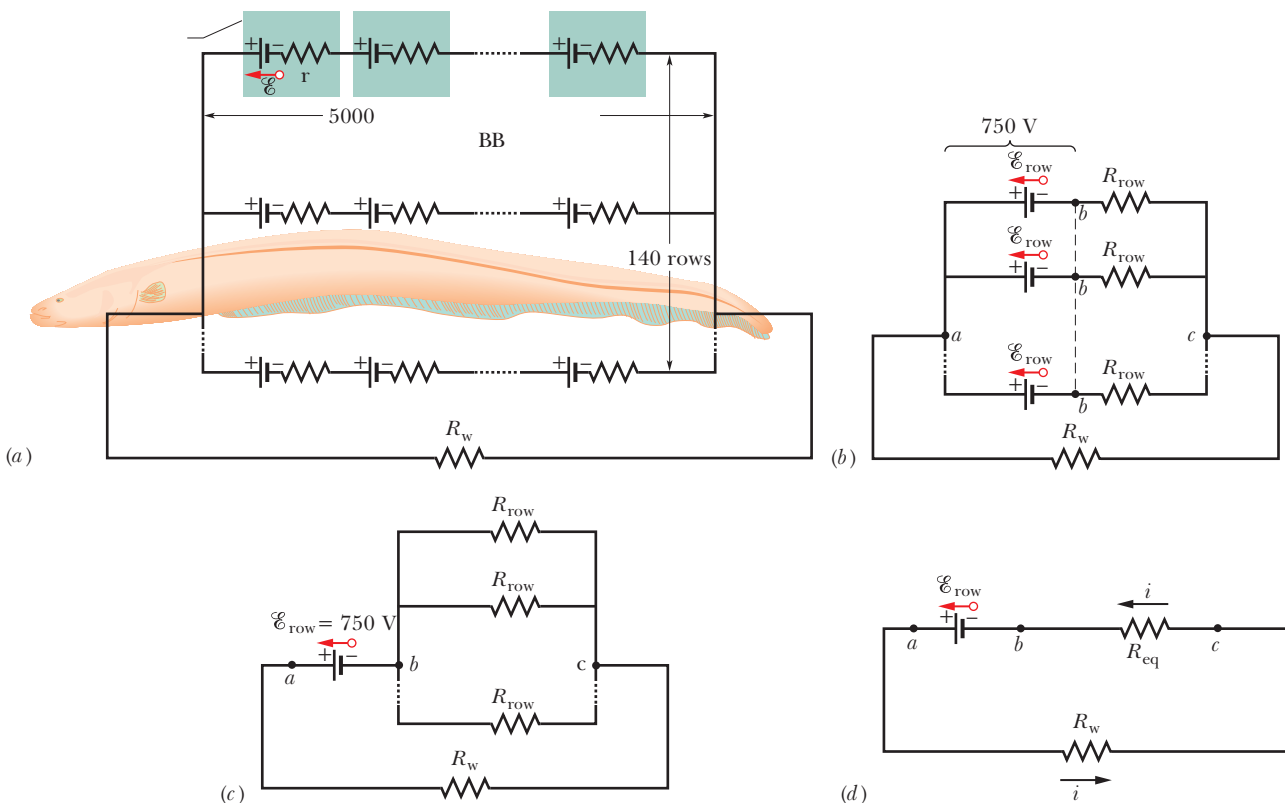
Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-4

Τα ηλεκτροφόρα ψάρια είναι ικανά να δημιουργούν ρεύμα μέσω βιολογικών κυττάρων που ονομάζονται ηλεκτροφόρα κύτταρα (electroplaques), τα οποία αποτελούν φυσικές συσκευές ΗΕΔ. Τα ηλεκτροφόρα κύτταρα σ' έναν τύπο ψαριού, γνωστό σαν το χέλι της Νοτίου Αμερικής, είναι διατεταγμένα σε 140 γραμμές, όπου κάθε γραμμή εκτείνεται οριζόντια κατά μήκος του σώματος και περιλαμβάνει 5000 ηλεκτροφόρα κύτταρα. Η διάταξη αυτή παριστάνεται στο Σχ. 27-13α. Κάθε κύτταρο έχει ΗΕΔ ίση με 0.15 V κι εσωτερική αντίσταση r ίση με 0.25Ω . Το νερό που βρίσκεται γύρω από το χέλι συμπληρώνει ένα κύκλω-

μα μεταξύ των δύο άκρων των γραμμών ηλεκτροφόρων κυττάρων, με το ένα άκρο στο κεφάλι του ζώου και το άλλο κοντά στην ουρά του.

(α) Αν το νερό που βρίσκεται γύρω από το χέλι έχει αντίσταση $R_w = 800 \Omega$, πόσο ρεύμα μπορεί να παράγει το χέλι μέσα στο νερό;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ: Μπορούμε να απλοποιήσουμε το κύκλωμα του Σχ. 27-13α αντικαθιστώντας τις συσκευές ΗΕΔ και τις εσωτερικές αντιστάσεις τους με ισοδύναμες συσκευές ΗΕΔ και αντιστάσεις.



ΣΧΗΜΑ 27-13 (α) Ένα μοντέλο του ηλεκτρικού κυκλώματος ενός χελιού μέσα στο νερό. Κάθε ηλεκτροφόρο κύτταρο του χελιού έχει ΗΕΔ $\mathcal{E}$ και εσωτερική αντίσταση r . Κατά μήκος καθεμιάς από τις 140 γραμμές που εκτείνονται από το κεφάλι μέχρι την ουρά του χελιού, υπάρχουν 5000 ηλεκτροφόρα κύτταρα. Το νερό γύρω από το χέλι έχει αντίσταση R_w . (β) Η ΗΕΔ $\mathcal{E}_{\text{row}}$ και η αντίσταση R_{row} κάθε γραμμής. (γ) Η ΗΕΔ ανάμεσα στα σημεία a και b είναι $\mathcal{E}_{\text{row}}$. Ανάμεσα στα σημεία b και c υπάρχουν 140 αντιστάσεις R_{row} συνδεδεμένες παράλληλα. (δ) Το απλοποιημένο κύκλωμα, με την R_{eq} να αντικαθιστά το συνδυασμό των παράλληλων αντιστάσεων.

Υπολογισμοί: Ας θεωρήσουμε αρχικά μια μόνο γραμμή. Η συνολική ΗΕΔ $\mathcal{E}_{\text{row}}$ κατά μήκος μιας γραμμής από 5000 ηλεκτροφόρα κύτταρα θα είναι το άθροισμα των ΗΕΔ,

$$\mathcal{E}_{\text{row}} = 5000\mathcal{E} = (5000)(0.15 \text{ V}) = 750 \text{ V}.$$

Η συνολική αντίσταση R_{row} κατά μήκος μιας γραμμής θα είναι το άθροισμα των εσωτερικών αντιστάσεων των 5000 ηλεκτροφόρων κυττάρων:

$$R_{\text{row}} = 5000r = (5000)(0.25 \Omega) = 1250 \Omega.$$

Μπορούμε τώρα να παραστήσουμε κάθε μία από τις 140 πανομοιότυπες γραμμές σαν να έχει μια μοναδική ΗΕΔ $\mathcal{E}_{\text{row}}$ και μια μοναδική αντίσταση R_{row} (Σχ. 27-13β).

Στο Σχ. 27-13β, η ΗΕΔ ανάμεσα στο σημείο a και το σημείο b σε οποιαδήποτε γραμμή είναι $\mathcal{E}_{\text{row}} = 750 \text{ V}$. Επειδή οι γραμμές είναι πανομοιότυπες και επειδή όλες συνδέονται μεταξύ τους στα αριστερά στο Σχ. 27-13β, όλα τα σημεία b στο σχήμα αυτό βρίσκονται στο ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό. Επομένως, μπορούμε να θεωρήσουμε πως συνδέονται έτσι ώστε να υπάρχει ένα μοναδικό σημείο b . Η ΗΕΔ ανάμεσα στο σημείο a και αυτό το μοναδικό σημείο b είναι $\mathcal{E}_{\text{row}} = 750 \text{ V}$, άρα μπορούμε να σχεδιάσουμε το κύκλωμα όπως φαίνεται στο Σχ. 27-13γ.

Μεταξύ των σημείων b και c στο Σχ. 27-13γ υπάρχουν 140 αντιστάσεις $R_{\text{row}} = 1250 \Omega$, όλες συνδεδεμένες παράλληλα. Η ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} αυτού του συνδυασμού δίνεται από την Εξ. 27-24 σαν

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum_{j=1}^{140} \frac{1}{R_j} = 140 \frac{1}{R_{\text{row}}},$$

$$\text{ή} \quad R_{\text{eq}} = \frac{R_{\text{row}}}{140} = \frac{1250 \Omega}{140} = 8.93 \Omega.$$

Αντικαθιστώντας τον παράλληλο συνδυασμό με την R_{eq} , παίρνουμε το απλοποιημένο κύκλωμα του Σχ. 27-13δ.

Εφαρμόζοντας τον κανόνα των βρόχων σ' αυτό το κύκλωμα, ξεκινώντας από το σημείο b και διατρέχοντάς το δεξιόστροφα, έχουμε

$$\mathcal{E}_{\text{row}} - iR_w - iR_{\text{eq}} = 0.$$

Λύνοντας ως προς i και αντικαθιστώντας με τα γνωστά δεδομένα, βρίσκουμε

$$i = \frac{\mathcal{E}_{\text{row}}}{R_w + R_{\text{eq}}} = \frac{750 \text{ V}}{800 \Omega + 8.93 \Omega} = 0.927 \text{ A} \approx 0.93 \text{ A}. \quad (\text{Απάντηση})$$

Αν το κεφάλι ή η ουρά του χελιού είναι κοντά σε κάποιο ψάρι, μέρος από αυτό το ρεύμα θα μπορούσε να περάσει κατά μήκος μιας σύντομης διαδρομής διαμέσου του ψαριού, «χτυπώντας» το ή σκοτώνοντάς το.

(β) Πόσο ρεύμα i_{row} περνά από κάθε γραμμή του Σχ. 27-13α;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ: Επειδή οι γραμμές είναι πανομοιότυπες, το ρεύμα που εισέρχεται και εξέρχεται από το χέλι διαμοιράζεται εξ ίσου μεταξύ των γραμμών.

Υπολογισμοί: Επομένως, γράφουμε

$$i_{\text{row}} = \frac{i}{140} = \frac{0.927 \text{ A}}{140} = 6.6 \times 10^{-3} \text{ A}. \quad (\text{Απάντηση})$$

Συνεπώς, το ρεύμα διαμέσου κάθε γραμμής είναι μικρό, περίπου δυο τάξεις μεγέθους μικρότερο από το ρεύμα που διαρρέει το νερό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα να διαχέεται στο σώμα του χελιού, έτσι ώστε το χέλι να μην αναισθητοποιείται ή να σκοτώνεται όταν αναισθητοποιεί ή σκοτώνει ένα άλλο ψάρι.

ΤΑΚΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

ΤΑΚΤΙΚΗ 2: Επιλύοντας Κυκλώματα με Μπαταρίες και Αντιστάτες Παρουσιάζουμε δύο γενικές τεχνικές για την επίλυση κυκλωμάτων ως προς άγνωστα ρεύματα ή διαφορές δυναμικού.

1. Αν μπορείτε να απλοποιήσετε ένα κύκλωμα αντικαθιστώντας αντιστάτες συνδεδεμένους σε σειρά ή παράλληλα με την ισοδύναμή τους αντίσταση, κάντε το. Αν μπορείτε να αναγάγετε το κύκλωμα σε έναν μόνο βρόχο, τότε μπορείτε να υπολογίσετε το ρεύμα που διαρρέει τη μπαταρία με αυτό το βρόχο, όπως στο Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-2α. Στη συνέχεια ενδέχεται να χρειαστεί να δουλέψετε αντίστροφα, ανακτώντας τις απλοποιήσεις των αντιστάτων, προκειμένου να υπολογίσετε το ρεύμα ή τη διαφορά δυναμικού για κάποιον από τους επιμέρους αντιστάτες, όπως στο Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-2β.

2. Αν ένα κύκλωμα δεν μπορεί να απλοποιηθεί σε έναν μοναδικό βρόχο, χρησιμοποιήστε τον κανόνα των κόμβων και τον κανόνα των βρόχων για να φτάσετε σε ένα σύστημα εξισώσεων, όπως στο Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-3. Θα πρέπει να έχετε μόνο τόσες ανεξάρτητες εξισώσεις όσοι είναι και οι άγνωστοι στις εξισώσεις αυτές. Αν πρέπει να βρείτε το ρεύμα ή τη διαφορά δυναμικού για έναν συγκεκριμένο αντιστάτη, βεβαιωθείτε ότι το ρεύμα του ή η διαφορά δυναμικού του εμφανίζεται στις εξισώσεις, συμπεριλαμβανοντας τουλάχιστον ένα βρόχο που να τον διατρέχει.

ΤΑΚΤΙΚΗ 3: Αυθαίρετες Επιλογές κατά την Επίλυση Προβλημάτων με Κυκλώματα Στο Ενδεικτικό Πρόβλημα 27-3 κάναμε αρκετές αυθαίρετες επιλογές προτού γράψουμε έστω και μία εξίσωση. (1) Υποθέσαμε αυθαίρετα τις κατευθύνσεις

των ρευμάτων του Σχ. 27-12. (2) Επιλέξαμε αυθαίρετα για ποιους από τους τρεις πιθανούς βρόχους θα γράψουμε εξισώσεις. (3) Επιλέξαμε αυθαίρετα τη κατεύθυνση με την οποία διατρέχουμε καθένα βρόχο. (4) Επιλέξαμε αυθαίρετα το σημείο έναρξης και τερματισμού για τη διάσχιση κάθε βρόχου.

Όλες αυτές οι αυθαίρετες επιλογές συνήθως προκαλούν ανησυχία σε έναν αρχάριο που επιθυμεί να επιλύσει ένα κύκλωμα, ωστόσο κάποιος πεπειραμένος γνωρίζει πως δεν έχουν σημασία. Απλά κρατήστε στο μυαλό σας δυο κανόνες: Πρώτον, βεβαιωθείτε πως διατρέχετε πλήρως κάθε βρόχο που επιλέξατε. Δεύτερον, από τη στιγμή που επιλέξετε μια

κατεύθυνση για κάποιο ρεύμα, διατηρήστε αυτή τη κατεύθυνση μέχρις ότου να υπολογίσετε αριθμητικές τιμές για όλα τα ρεύματα. Αν έχετε κάνει λάθος για κάποια κατεύθυνση ρεύματος, θα σας το επισημάνει το αλγεβρικό αποτέλεσμα μ' ένα αρνητικό πρόσημο. Στο σημείο αυτό μπορείτε να κάνετε μια διόρθωση, σβήνοντας απλώς το αρνητικό πρόσημο και αντιστρέφοντας τη κατεύθυνση του βέλους που παριστάνει αυτό το ρεύμα στο διάγραμμα του κυκλώματος. Ωστόσο, αυτή η διόρθωση δεν θα πρέπει να γίνει πριν την ολοκλήρωση όλων των απαραίτητων υπολογισμών για το κύκλωμα, όπως ακριβώς κάναμε στο τελευταίο βήμα του Ενδεικτικού Προβλήματος 27-3.

27-8 Το Αμπερόμετρο και το Βολτόμετρο

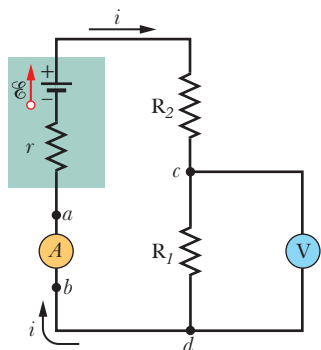
Ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ρεύματος ονομάζεται αμπερόμετρο. Για να μετρήσετε το ρεύμα σ' ένα καλώδιο, συνήθως πρέπει να σπάσετε ή να κόψετε το καλώδιο και να εισάγετε το αμπερόμετρο έτσι ώστε το ρεύμα που θέλετε να μετρήσετε να περνάει από το όργανο. (Στο Σχ. 27-14 το αμπερόμετρο A έχει συνδεθεί έτσι ώστε να μετρά το ρεύμα i).

Είναι ουσιώδες η εσωτερική αντίσταση R_A του αμπερομέτρου να είναι κατά πολύ μικρότερη των άλλων αντιστάσεων του κυκλώματος. Διαφορετικά, και μόνο η παρουσία του οργάνου μέτρησης στο κύκλωμα θα μεταβάλλει σημαντικά την τιμή του ρεύματος που θέλουμε να μετρήσουμε.

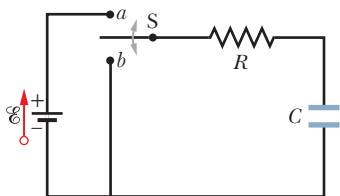
Ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση διαφορών δυναμικού ονομάζεται βολτόμετρο. Για να βρούμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων ενός κυκλώματος, οι ακροδέκτες του βολτόμετρου συνδέονται μεταξύ αυτών των σημείων χωρίς να σπάσουμε ή να κόψουμε το καλώδιο. (Στο Σχ. 27-14 το βολτόμετρο V έχει συνδεθεί έτσι ώστε να μετρά την τάση στα άκρα της R_1 .)

Είναι ουσιώδες η εσωτερική αντίσταση $\mathcal{R}_V$ του βολτόμετρου να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση οποιουδήποτε στοιχείου κατά μήκος του οποίου συνδέεται. Διαφορετικά, το ίδιο το όργανο μέτρησης γίνεται ένα σημαντικό στοιχείο του κυκλώματος και μεταβάλλει τη διαφορά δυναμικού που θέλουμε να μετρήσουμε.

Συχνά ένα και μόνο όργανο μέτρησης κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε, χρησιμοποιώντας έναν διακόπτη, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σαν αμπερόμετρο, όσο και σαν βολτόμετρο (και συνήθως και σαν ωμόμετρο, ένα όργανο σχεδιασμένο ώστε να μετράει την αντίσταση οποιουδήποτε στοιχείου συνδέεται στους ακροδέκτες του). Ένα τέτοιο όργανο ονομάζεται πολύμετρο.



ΣΧΗΜΑ 27-14 Ένα κύκλωμα ενός βρόχου, το οποίο δείχνει πώς να συνδέσουμε ένα αμπερόμετρο (A) και ένα βολτόμετρο (V).



ΣΧΗΜΑ 27-15 Όταν ο διακόπτης S κλείνει στο σημείο a , ο πυκνωτής φορτίζεται μέσω του αντιστάτη. Στη συνέχεια, όταν ο διακόπτης κλείνει στο σημείο b , ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω του αντιστάτη.

27-9 Κυκλώματα RC

Στις προηγούμενες παραγράφους ασχοληθήκαμε αποκλειστικά με κυκλώματα όπου τα ρεύματα δεν μεταβάλλονταν με τον χρόνο. Εδώ, ξεκινάμε μια μελέτη για χρονικά μεταβαλλόμενα ρεύματα.

Φορτίζοντας έναν Πυκνωτή

Ο πυκνωτής χωρητικότητας C στο Σχ. 27-15 είναι αρχικά αφόρτιστος. Για να τον φορτίσουμε, κλείνουμε το διακόπτη S στο σημείο a . Έτσι σχηματίζουμε ένα κύ-